



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL CÓRDOBA
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA SATELITAL
Tesis para la Mención Sistemas Mecánicos**

**Desarrollo de una Metodología
para la Calibración Radiométrica
de una Cámara Hiperespectral**

MARÍA EMILIA PEREYRA



**Córdoba
Febrero de 2018**



DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA DE CÁMARAS HIPERESPECTRALES

Autora: Lic. María Emilia **Pereyra**

Presentado ante la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional
Córdoba, como parte de los requerimientos para la obtención del grado de:

MAGÍSTER EN TECNOLOGÍA SATELITAL

Mención: **Sistemas Mecánicos**

Director: Dr. Sergio **Masuelli**

Codirector: Lic. Martín **Labanda**

Miembros del tribunal de tesis:

Dra. Sonia M. **Cotes**

Dr. Julián A. **Pucheta**

Dr. Miguel A. **Ré**

Para Manu, Emi y Diego.

“I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meager and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of science, whatever the matter may be.”

– Lord Kelvin

Agradecimientos

El cierre de una etapa brinda la oportunidad de reflexionar sobre el camino recorrido y agradecer a quienes de una u otra manera colaboraron para que su objetivo se cumpla.

Esta tesis ha sido posible gracias a una beca otorgada por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) para la realización de la Maestría en Tecnología Satelital. Por lo tanto, agradezco enormemente a esta institución por la posibilidad brindada.

Al Director de la Maestría en Tecnología Satelital, Ing. Edgardo Roggero, al equipo docente de la Maestría y a las autoridades y personal de la Unidad de Formación Superior de CONAE, por sus conocimientos y buena predisposición a lo largo de los dos años de cursado. Han realizado un aporte importante a mi crecimiento profesional.

Mi profundo agradecimiento a mi director Dr. Sergio Masuelli y codirector Lic. Martín Labanda, quienes guiaron este trabajo de tesis.

A Leandro Rocco, compañero durante el desarrollo de esta tesis, con el que compartimos muchas horas de intenso y desafiante trabajo en el laboratorio.

A Antonio Menescardi, Tutor de la Unidad de Desarrollo, por su buena disposición, sus aportes y gestiones que fueron indispensables para la realización de esta tesis.

Al Laboratorio de Óptica de la Unidad de Formación Superior de CONAE por brindarnos el espacio para la realización de las experiencias y a su responsable, Ing. Marco Álvarez Reyna, por su colaboración activa en la preparación de las mismas.

A mis compañeros de la MTS, con los cuales hemos vivido dos años intensos de estudio y trabajo. Les agradezco por su compañía y buen humor.

A mi familia toda. En particular a mis padres que siempre me han acompañado, dándome soporte y ayudándome a alcanzar mis metas.

A Manu y Emi, por todas las horas de juego que cedieron para que pudiera realizar esta tesis. Y por brindarme tanto amor y alegría, que me inspiran y motivan todos los días.

Y especialmente a Diego. Esto no hubiera sido posible sin tu acompañamiento incondicional, tu paciencia, tu aliento en el momento justo y tu amor constante. Gracias por creer en mí.

Resumen

La teledetección hiperespectral ha demostrado ser una herramienta valiosa para la observación de la superficie terrestre. Los datos que provee una cámara hiperespectral permiten la identificación y clasificación de distintas coberturas del suelo a partir de las propiedades espectrales de los materiales que las componen. La información generada a partir de imágenes hiperespectrales son aplicables a numerosos proyectos de estudio y gestión del ambiente y los recursos naturales. A fin de aprovechar las ventajas distintivas de este instrumento para generar información de valor agregado es necesario desarrollar procesamientos específicos, pero para ello es necesario e imprescindible realizar una calibración de alta calidad del mismo.

En el presente trabajo de tesis se propone una metodología para realizar esta calibración en el contexto del desarrollo de una misión satelital. Para que esta metodología sea útil, comprende aspectos técnicos y programáticos del proceso, abarcando el problema en su totalidad. El propósito del desarrollo de esta metodología es contar con pautas para la elaboración de un plan de calibración que asegure una calibración radiométrica confiable.

Adicionalmente, se propone validar algunos aspectos técnicos de esta metodología aplicándola a la calibración de una cámara hiperespectral VNIR (Visible/Near InfraRed), disponible en el Laboratorio de Óptica de la Unidad de Formación Superior de la CONAE. La implementación de esta calibración permite extraer información útil para refinar la metodología propuesta.

Índice general

Índice General	xi
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tablas	xix
1. Introducción	1
1.1. Motivación e importancia del trabajo	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Sobre el desarrollo de una metodología para calibrar	5
1.4. Organización del trabajo	6
2. Proyectos satelitales	9
2.1. Elementos de una misión satelital	9
2.2. Ciclo de vida de un proyecto satelital	13
2.3. Definición de requerimientos	18
2.4. Verificación de requerimientos	22
2.5. Calibración pre-lanzamiento	26
2.6. Alcance de un proyecto y organización del trabajo	28
2.7. Algunos comentarios sobre cronograma, costo y riesgos	30
3. Teledetección hiperespectral	33
3.1. Antecedentes históricos y aplicaciones	34
3.2. Adquisición remota de imágenes	38
3.2.1. Magnitudes radiométricas	39
3.3. Muchas bandas espectrales contiguas	41
3.3.1. Muestreo y resoluciones	44
3.4. Derivación de un espectro de reflectancia completo	45

4. Calibración de cámaras hiperespectrales	49
4.1. Calibrar como proceso	49
4.1.1. Estándar de calibración	51
4.1.2. Mediciones y estimación de incertezas	52
4.2. Fuentes de referencia para la calibración	54
4.2.1. Referencias para la calibración espectral	54
4.2.2. Referencias para la calibración radiométrica	55
4.3. Caracterización de cámaras hiperespectrales	57
4.3.1. Caracterización del sensor	57
4.3.2. Caracterización del sistema	62
4.4. Calibración espectral	65
4.5. Calibración radiométrica	66
5. Metodología para calibrar una cámara hiperespectral	69
5.1. Propósito y alcance de la metodología	70
5.2. Roles y responsabilidades	70
5.3. Etapas del proceso de calibración	73
5.3.1. Requerimientos para la calibración	75
5.3.2. Caracterización del instrumento	79
5.3.3. Calibración espectral	82
5.3.4. Calibración radiométrica	84
5.4. Tareas auxiliares	85
5.5. Organización de las tareas a realizar	87
5.6. Terminación de cada etapa	88
5.7. Reportes de actividades y resultados	89
5.8. Lecciones aprendidas	91
5.9. Cronograma y evaluación del progreso de la calibración	92
5.10. Plan de calibración en laboratorio	93
6. Un caso de calibración radiométrica	97
6.1. Descripción del instrumento a calibrar	97
6.2. Identificación de requerimientos para la calibración	102
6.2.1. Rango espectral	102
6.2.2. Rango dinámico	102
6.2.3. Tiempos de integración	103

6.3. Caracterización del instrumento	106
6.3.1. Modelo del sensor	106
6.3.2. Caracterización de linealidad, ruido y no uniformidades . .	107
6.4. Calibración espectral	111
6.5. Calibración radiométrica	115
6.5.1. Caracterización de la fuente de referencia	115
6.5.2. Modelo radiométrico y cálculo de coeficientes	120
6.5.3. Adquisición de datos	122
6.5.4. Resultados de la calibración radiométrica	123
6.6. Discusión de resultados y conclusiones	131
6.7. Discusión del proceso	133
6.7.1. Lecciones aprendidas (“Lessons learned”)	137
7. Conclusiones	139
7.1. Trabajo futuro	140
Bibliografía	150

Índice de figuras

1.1. Concepto de teledetección hiperespectral, que muestra cómo se forma una imagen hiperespectral (adaptado de [5]).	2
2.1. Composición de un sistema espacial. Cada uno de los segmentos aporta una funcionalidad a la misión (adaptado de [21]).	10
2.2. Ciclo de vida típico de un proyecto satelital, fases y revisiones más relevantes, de acuerdo a NASA [25]. SRR: <i>System Requirements Review</i> ; SDR: <i>System Design Review</i> ; PDR: <i>Preliminary Design Review</i> ; CDR: <i>Critical Design Review</i> ; STRR: <i>System Test Readiness Review</i> ; FRR: <i>Flight Readiness Review</i> ; PLAR: <i>Post-Launch Assessment Review</i>	14
2.3. Relación entre objetivos de la misión y requerimientos de cada segmento (adaptado de [21]).	19
2.4. Flujo de requerimientos de una misión satelital, desde los objetivos de la misión hasta los requerimientos de subsistemas (adaptado de [21]).	22
2.5. Lógica de la planificación de la verificación (adaptado de ECSS-E-ST-10-20-C [27]).	25
2.6. Ciclo de vida del instrumento dentro de un proyecto satelital [17]. En este diagrama se distingue el lugar que ocupa la calibración en laboratorio.	27
2.7. Ejemplo de una WBS genérica, en la cual se distinguen distintos elementos o paquetes de trabajo. Referencias: Mgmt: <i>management</i> o gerencia; SE: ingeniería de sistema; S&MA: <i>Safety and Mission Assurance</i> ; I& V: integración y verificación.	29
3.1. Respuesta espectral de bandas 1 a 4 y 8 del visible, del instrumento <i>Thematic Mapper</i> del Landsat 5 (imagen adaptada de [33]).	34
3.2. Diferencia entre imágenes multispectrales e hiperespectrales (imagen adaptada de [15]).	35
3.3. Elementos de la teledetección y algunas magnitudes físicas involucradas.	39

3.4.	Esquema general que muestra los componentes de un sistema dispersivo de captura de imágenes hiperespectrales (adaptado de [5]).	41
3.5.	Esquema básico en el que se observan los elementos que componen un sistema de captura de imágenes hiperespectrales (adaptado de [1]).	42
3.6.	Hipercubo. Estructura de una imagen hiperespectral conformada por sucesivas adquisiciones del instrumento. Para cada píxel de la línea adquirida se conforma un espectro del que pueden identificarse los materiales presentes en la escena (imagen adaptada de [5]).	43
3.7.	Irradiancia solar en el tope de la atmósfera (<i>TOA</i>) e irradiancia solar al nivel del suelo (imagen adaptada de [5]).	46
3.8.	Etapas en el proceso de obtener información espectral sobre la escena a partir de los datos crudos generados por una cámara hiperespectral.	48
4.1.	Esquema que muestra la relación entre exactitud, precisión y el valor “real” o de referencia de la magnitud medida (imagen extraída de Wikimedia Commons).	53
4.2.	Esquema de un monocromador de Czerny-Turner (imagen adaptada de [71]).	54
4.3.	Configuración utilizada para la calibración radiométrica usando una lámpara como fuente de referencia. El panel difusor cumple la función de generar una señal uniforme y Lambertiana (imagen adaptada de [1]).	55
4.4.	Modelo del sensor de una cámara hiperespectral. Las variables indicadas con μ representan valores medios y σ su desviación estándar (imagen adaptada de [73]).	58
4.5.	Ejemplo de imagen ideal e imágenes que presentan distorsiones <i>smile</i> y <i>keystone</i> (imagen adaptada de [75]).	64
4.6.	Determinación de resolución espectral a partir del cálculo de FWHM de la función gaussiana ajustada a los datos.	66
5.1.	Roles involucrados en el proceso de calibración y relaciones entre ellos. Tanto el laboratorio donde se realizan las experiencias de calibración como el responsable del instrumento pueden, en principio, no pertenecer al proyecto.	73
5.2.	Derivación de requerimientos de calibración y elementos involucrados en estudios de compromisos a fin de elaborar un plan de calibración de laboratorio.	77

5.3.	Diagrama conceptual que muestra un ejemplo de los paquetes de trabajo a considerar para la calibración en laboratorio de una cámara hiperespectral, indicando a quién corresponde la responsabilidad de cada uno.	88
5.4.	Diagrama que describe el desarrollo y la terminación de una etapa o un conjunto de pruebas dentro de una etapa.	89
5.5.	Diagrama que muestra las etapas del proceso de calibración de una cámara hiperespectral propuestas en el presente trabajo. . .	91
6.1.	Esquema de los elementos que componen el instrumento a calibrar (imagen adaptada de [76]).	98
6.2.	Eficiencia cuántica del sensor CCD, de acuerdo al fabricante (adaptado de [78]).	100
6.3.	Arquitectura del sensor CCD (adaptado de Kodak Kai 2001 Device Performance Specification [78]).	100
6.4.	Esquema de imagen del espectrógrafo proyectada sobre el sensor CCD, mostrando área del sensor que efectivamente recibe radiación.	101
6.5.	Radiancia espectral medida por AVIRIS para el sitio de calibración Salar de Arizaro, Argentina, 7 de febrero de 2001. Promedio de 2000 espectros (extraída de [80]).	103
6.6.	Geometría de un sistema de captura de imágenes hiperespectrales <i>pushbroom</i> como el del sistema hiperespectral del cual forma parte la cámara VNIR (adaptado de [5]).	104
6.7.	Modelo del sensor propuesto para la descripción de su desempeño.	107
6.8.	Desviación relativa de la linealidad con la radiancia para la columna 800 (extraída de [83]).	108
6.9.	Desviación relativa de la linealidad con el tiempo de integración para la columna 800 (extraída de [83]).	108
6.10.	SNR del sistema espectrógrafo + sensor CCD, en función del nivel de señal en DN. Se grafica además un ajuste de los datos por una función raíz cuadrada, para mostrar que estos presentan un comportamiento compatible con dicha función.	110
6.11.	Imagen de la lámpara de descarga de HgAr utilizada para la calibración espectral, adquirida por la cámara con $t_{int} = 200ms$. La escala se encuentra en DN.	112
6.12.	Espectro no calibrado de la lámpara de HgAr, adquirido con la cámara VNIR, correspondiente a la columna 800 del sensor. . . .	112
6.13.	Ejemplo de ajuste gaussiano y determinación del centro, para uno de los picos (líneas espectrales) del espectro de la <i>Figura 6.11</i> . . .	113

6.14. Ajuste polinómico y residuos, correspondiente a la columna 800 del sensor (extraído de [83]). Cada uno de los datos graficados corresponde a un pico (línea espectral) identificado de la <i>Figura 6.12</i>	113
6.15. <i>Smile</i> correspondiente a la fila 850 del sensor.	114
6.16. Configuración utilizada para la caracterización de la esfera de integración. Se puede observar el espectroradiómetro colocado sobre el soporte frente al puerto de la esfera. En el extremo del espectroradiómetro el adaptador de 8° de FOV.	116
6.17. Distintos niveles de radiancia espectral de la esfera integradora USS-4000, para 1 a 8 lámparas encendidas. En el gráfico se incluye además el nivel de radiancia espectral máximo esperado de acuerdo a los requerimientos planteados en la <i>Sección 6.2</i>	117
6.18. Superficie del puerto de la esfera considerada para la caracterización de uniformidad de la fuente de referencia.	118
6.19. Medida de la uniformidad de la esfera integradora US-4000, para cada nivel de radiancias espectrales disponibles (1 a 8 lámparas encendidas).	119
6.20. Incerteza relativa máxima asociada a la radiancia espectral de la esfera integradora en función de la longitud de onda.	119
6.21. Esquema del método propuesto para la calibración radiométrica de la cámara hiperespectral VNIR.	121
6.22. Configuración utilizada para la adquisición de datos para la calibración radiométrica.	122
6.23. Perfiles de los datos en DN, para la columna 800 del sensor y para cada uno de los 8 niveles de iluminación que provee la esfera integradora.	123
6.24. Coeficiente de calibración ganancia $G(i, j)$, en $(DN \ m^2 \ sr \ nm \ W^{-1})$, para cada uno de los 941×1600 píxeles del sensor efectivamente iluminados.	124
6.25. Coeficiente de calibración ganancia $G(i, j)$, en $(DN \ m^2 \ sr \ nm \ W^{-1})$, para cada uno de los 941×1600 píxeles del sensor efectivamente iluminados. Vista en 3D.	124
6.26. Coeficiente de calibración <i>offset</i> $D(i, j)$ en DN, para cada uno de los 941×1600 píxeles del sensor efectivamente iluminados.	125
6.27. Coeficiente de calibración <i>offset</i> $D(i, j)$ en DN, para cada uno de los 941×1600 píxeles del sensor efectivamente iluminados. Vista en 3D.	125
6.28. Cantidad Δy en función de la longitud de onda (fila del sensor). Esta indica una medida de la calidad del ajuste lineal realizado.	126
6.29. Radiancia espectral calibrada a partir de imágenes adquiridas frente a la esfera integradora, para un tiempo de integración de 5 ms.	127

6.30. Arriba: incerteza relativa de la radiancia espectral calibrada; abajo: error relativo de la radiancia espectral calibrada. Datos adquiridos con un tiempo de integración t_{int} de 5 ms.	128
6.31. Arriba: imagen en DN generada por la cámara. Abajo: imagen calibrada en unidades de radiancia espectral ($Wm^{-2}sr^{-1}nm^{-1}$).	129
6.32. Radiancia espectral calibrada a partir de imágenes adquiridas frente a la esfera integradora, para un tiempo de integración de 9 ms. Columna 800 del sensor.	130
6.33. Arriba: incerteza relativa de la radiancia espectral calibrada; abajo: error relativo de la radiancia espectral calibrada. Datos adquiridos con un tiempo de integración distinto del utilizado en la calibración, en este caso t_{int} de 9 ms.	130
6.34. Plan de tareas a realizar para la calibración de la cámara VNIR.	134
6.35. Comparación entre cronogramas planificado y ejecutado de las actividades realizadas para la calibración de la cámara VNIR. Semana 1.	135
6.36. Comparación entre cronogramas planificado y ejecutado de las actividades realizadas para la calibración de la cámara VNIR. Semana 2.	136

Índice de tablas

2.1. Subsistemas típicos de un satélite y su función (extraído de [22]).	11
2.2. Clasificación de satélites de acuerdo a su masa, órbita y misión (extraído de [25]).	13
2.3. Características, tipos y elementos a ser documentados para cada requerimiento (adaptado de [21]).	20
2.4. Descripción de los distintos métodos utilizados para la verificación de requerimientos [25, 29].	24
3.1. Comparación entre características de los instrumentos Hyperion (espacial) y su contraparte AVIRIS (aerotransportado) [5].	37
3.2. Magnitudes radiométricas involucradas en la adquisición remota de imágenes y sus relaciones.	40
5.1. Roles que intervienen en el proceso de calibración y sus responsabilidades más relevantes.	71
5.2. Etapas propuestas para el proceso de calibración en laboratorio de una cámara hiperespectral.	74
5.3. Resumen de la etapa de definición de requerimientos.	78
5.4. Resumen de la etapa de caracterización del instrumento.	80
5.5. Resumen de la etapa de calibración espectral.	83
5.6. Resumen de la etapa de calibración radiométrica.	85
6.1. Características de la cámara según hoja de datos del fabricante [77].	99
6.2. Estimación del tiempo de integración para la calibración radiométrica.	105
6.3. Resultados más relevantes de la calibración espectral.	115

Acrónimos

ADC	Analog Digital Converter
AVIRIS	Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer
CBE	Current Best Estimate
CCD	Charge Coupled Device
CDR	Critical Design Review
CETT	Centro Espacial Teófilo Tabanera
CONAE	Comisión Nacional de Actividades Espaciales
DN	Digital Number
DS	Dark Signal
EMC	ElectroMagnetic Compatibility
EMI	ElectroMagnetic Interference
EO/IR	Electro-Optical / InfraRed
ESA	European Space Agency
FFOV	Full Field Of View
FOV	Field Of View
FPA	Focal Plane Array
FWHM	Full Width Half Maximum
GEO	Geosynchronous Earth Orbit
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sample Distance
HEO	High Earth Orbit
IFOV	Instantaneous Field Of View
ILS	Integrated Logistic Support
IMS	Integrated Master Schedule
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LEO	Low Earth Orbit
LWIR	Long Wave InfraRed
MCR	Mission Concept Review

MEO	Medium Earth Orbit
MTF	Modulation Transfer Function
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIR	Near InfraRed
ORR	Oerations Readiness Review
PDR	Preliminary Design Review
PLAR	Post-Launch Assessment Review
PMSR	Preliminary Mission and System Review
ROM	Rough Order of Magnitude
RS	Remote Sensing
SI	Système Internationale
sr	estereoradianes
SRF	Spectral Response Function
SRR	System Requirement Review
SWIR	ShortWave InfraRed
TDC	Thermal Dark Current
TRR	Test Readiness Review
UFS	Unidad de Formación Superior
VNIR	Visible Near InfraRed
V&V	Verificación y Validación
W	Watt
WBS	Work Breakdown Structure

1

Introducción

El uso de instrumentos ópticos pasivos a bordo de plataformas satelitales posibilita la adquisición sistemática de imágenes de la superficie terrestre sin entrar en contacto con ella y, por lo tanto, sin perturbarla. El procesamiento de estas imágenes permite derivar magnitudes físicas que, por cuestiones de costo, tiempo y recursos necesarios, resultarían difíciles de medir en la misma superficie. Estas magnitudes son luego utilizadas para caracterizar la composición de la escena capturada y describir fenómenos que en ella se desarrollan. Este proceso, denominado teledetección, provee datos valiosos para distintos campos de aplicación, como el monitoreo y la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales.

En particular, la teledetección hiperespectral (*Figura 1.1*) permite la identificación y caracterización de materiales presentes en la superficie terrestre a partir de mediciones de la radiación que llega al instrumento luego de interactuar con dichos materiales. Las imágenes hiperespectrales capturan simultáneamente el contenido espacial y espectral de la escena, con excelente resolución espectral. Con un instrumento bien calibrado es posible extraer una firma espectral asociada a cada píxel de la imagen y con ellas construir mapas que provean la distribución espacial de los materiales presentes en la misma.

Es así que desde su aparición a principios de los 1980, la teledetección hiperespectral ha demostrado ser de gran utilidad en distintas disciplinas relacionadas con la observación de la Tierra. Esta capacidad de los instrumentos hiperespectrales de extraer información píxel a píxel, junto con los avances en las tecnologías de detección y procesamiento, han permitido su aplicación en áreas de estudio como la geología, el uso del suelo, el mapeo de zonas urbanas, el análisis de aguas costeras y la detección de agentes químicos, entre otras [1–5].

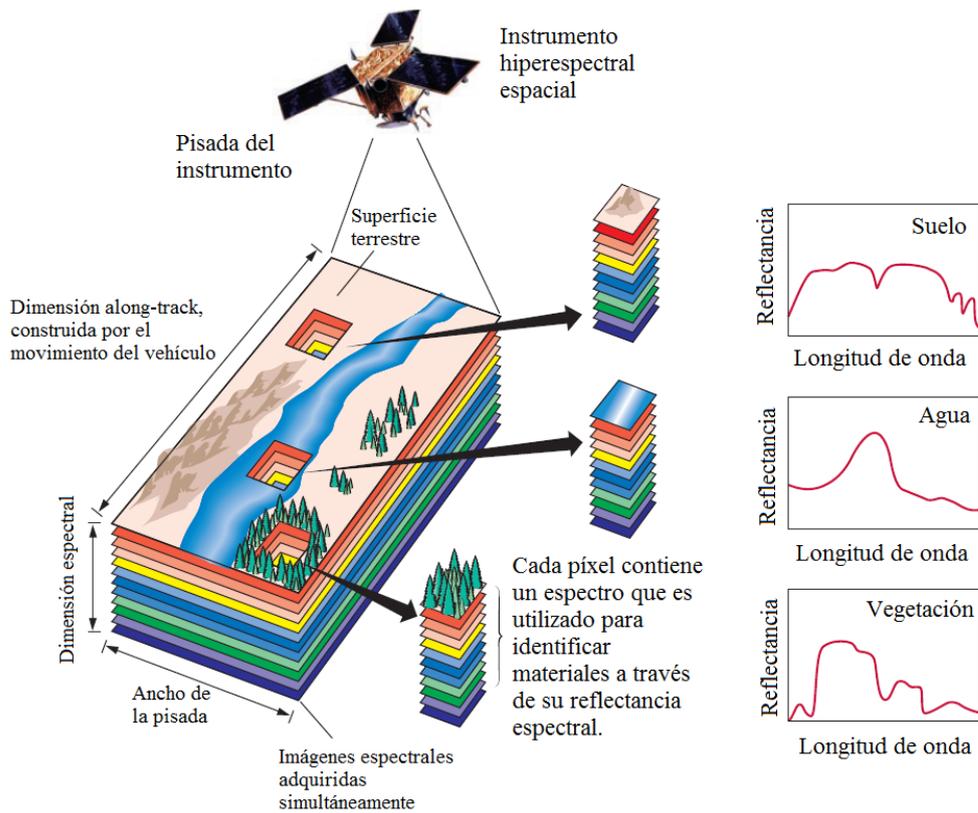


Figura 1.1. Concepto de teledetección hiperspectral, que muestra cómo se forma una imagen hiperspectral (adaptado de [5]).

La mayoría de los instrumentos hiperspectrales desarrollados hasta la fecha cubren la porción visible e infrarroja cercana (VNIR, 400 nm a 1000 nm) o infrarroja de onda corta (SWIR, 1000 nm a 2500 nm) del espectro electromagnético y han sido principalmente aerotransportados. Estos instrumentos son capaces de generar información en muchas bandas o canales espectrales (cien o más), con una resolución espectral por debajo de los 10 nm y una resolución espacial de decenas de metros. Un ejemplo de este tipo de instrumento es AVIRIS (*Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer*) [6,7]. Diseñado y operado por el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de NASA, ha sido utilizado desde finales de la década de 1980 en un gran número de experimentos y campañas de campo. Este instrumento resulta un caso ejemplar en cuanto a los métodos e instrumental utilizados para su calibración espectral y radiométrica, tanto en laboratorio como a bordo [8]. Otros instrumentos utilizados ampliamente en los últimos años son: HyMAP [9], *Compact Airborne Spectrographic Imager* (CASI) [10] y *Airborne Prism Experiment* (APEX) [11].

Adicionalmente, existen ejemplos de demostraciones tecnológicas de cámaras hiperspectrales en plataformas satelitales, como: Hyperion a bordo del *Earth*

Observing-1 (EO-1) de NASA [12,13] y *Compact High Resolution Imaging Spectrometer* (CHRIS) a bordo del microsatélite Proba-1 de ESA [14]. Estos han sido los principales proveedores de datos hiperespectrales de origen espacial durante las últimas décadas. La tecnología aplicada a instrumentos hiperespectrales para observación de la Tierra ha madurado, y se han desarrollado en estos últimos años muchos proyectos satelitales de distintos países [15].

1.1 Motivación e importancia del trabajo

La calibración de una cámara es un proceso que involucra la realización de un conjunto de experiencias en las cuales se identifican y cuantifican parámetros que describen el desempeño del instrumento y sus respuestas espectral y radiométrica. En particular, la calibración radiométrica permite, mediante la comparación con estándares reconocidos, asociar unidades físicas a los datos crudos provistos por la cámara, transformando a la cámara en un instrumento de medición de la magnitud física asociada. En el contexto de un proyecto satelital, contar con la calibración radiométrica en laboratorio permite sentar una base del funcionamiento y la respuesta de la cámara y verificar, antes de la puesta en órbita del instrumento, que este cumple con los requerimientos de la misión [16]. Esto favorece el éxito de la misma. Por este motivo, es importante planificar el proceso desde fases tempranas del proyecto, para asegurar que sus resultados sean confiables.

Los instrumentos hiperespectrales requieren, como se verá más adelante, una calibración que permita la reconstrucción de firmas espectrales de las coberturas presentes en la superficie observada, a partir de los datos crudos provistos por el instrumento. Esto impone requerimientos exigentes sobre las fuentes de referencia y métodos para la calibración espectral, a fin de poder establecer con precisión la longitud de onda y la resolución espectral de cada una de las muchas bandas contiguas en las que el instrumento adquiere información. Por otro lado, es necesario contar con una calibración radiométrica que permita establecer con precisión valores de radiancia espectral a fin de poder identificar los detalles característicos de las firmas espectrales, como por ejemplo, líneas de absorción.

La Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) está desarrollando su primer sistema aerotransportado de captura y procesamiento de información hiperespectral. Este sistema consta de dos instrumentos ópticos, uno capaz de adquirir en la porción visible e infrarroja cercana (VNIR, Visible/Near

InfraRed) del espectro electromagnético y el otro en la porción de infrarrojo de onda corta (SWIR, Short Wave InfraRed). Como parte de la puesta en funcionamiento de este sistema es necesario realizar la calibración de las cámaras.

La calibración de una cámara hiperespectral representa un desafío tecnológico para CONAE, por tratarse de un instrumento que no ha sido utilizado en proyectos anteriores y por las técnicas de calibración espectral y radiométrica que requiere. Atendiendo a esto, y dado que la tesista ha desarrollado sus tareas de Tutoría de Investigación en la Unidad de Desarrollo en la cual se lleva adelante el proyecto antes mencionado, este trabajo de tesis se propone el desarrollo de una metodología que represente una guía de referencia para realizar la calibración en laboratorio de cámaras hiperespectrales. Se espera que esta metodología resulte una base para futuros procesos de calibración radiométrica para posibles misiones satelitales de CONAE que incluyan cámaras hiperespectrales. Se propone además aplicar algunos elementos de esta metodología para la calibración de una de las cámaras que componen el sistema en desarrollo antes mencionado, a fin de aportar información que permita refinar y mejorar la metodología.

Desde la perspectiva del desarrollo de un proyecto satelital, la calibración en laboratorio representa generalmente una de las últimas instancias antes de la entrega o integración del instrumento al vehículo [17]. Es conveniente contar con una metodología de calibración orientada a la generación de un plan de calibración que guíe el proceso. Contar con este plan permite dimensionar el proceso, determinar la manera más eficiente de implementar la calibración en función de los requerimientos de desempeño del instrumento y minimizar incertezas, costos, riesgos y tiempo. En este sentido, la presente tesis aporta pautas generales para la implementación del proceso de calibración en laboratorio de una cámara hiperespectral, dentro del propio desarrollo del proyecto satelital.

1.2 Objetivos

El objetivo primario de la presente tesis es sentar las bases de una metodología para la calibración radiométrica en laboratorio de cámaras hiperespectrales. Esta metodología pretende incorporar las características particulares de este tipo de instrumento y realizar aportes a la elaboración y gestión de un plan de calibración en laboratorio desde fases tempranas del proyecto.

Adicionalmente, para poner a prueba y refinar la metodología propuesta, este trabajo tiene por objetivo secundario realizar la calibración radiométrica de

una cámara hiperspectral capaz de adquirir información en la porción visible e infrarroja cercana (VNIR) del espectro electromagnético.

1.3 Sobre el desarrollo de una metodología para calibrar

A fin de comprender mejor los objetivos y el alcance del presente trabajo de tesis, a continuación se definen algunos conceptos que permiten establecer qué se entiende por desarrollar una metodología para la calibración de una cámara hiperspectral. Entre estos conceptos, el más relevante es el de metodología. Su definición presenta variaciones dependiendo del contexto en que se lo utilice. En un contexto de investigación científica, una metodología es un análisis sistemático y teórico de los métodos aplicados al campo de estudio considerado. Para un problema de investigación la metodología no ofrece una solución específica, si no que ofrece un método o conjunto de métodos o mejores prácticas fundamentados en un marco teórico que pueden aplicarse para llegar a una solución [18].

En un sentido más general, una metodología es un conjunto de métodos, reglas y postulados utilizados en una disciplina en particular. Por ejemplo, en el contexto del desarrollo de proyectos, la metodología es el conjunto de métodos y buenas prácticas que permiten la planificación, diseño, implementación y evaluación del progreso del proyecto, a fin de cumplir con los objetivos del mismo. Así, la metodología permite definir de manera adecuada el alcance del proyecto, sus requerimientos y restricciones, los recursos y el tiempo necesario [19].

En este contexto, la metodología que se propone en el presente trabajo se aplica a la implementación del proceso de calibración en laboratorio de una cámara hiperspectral. Este proceso constituye una serie de acciones que permiten, como se verá en detalle en el *Capítulo 4*, convertir un dispositivo electro-óptico en un instrumento de medición, de acuerdo a un conjunto de restricciones y condiciones de uso y validez. La misma se elabora en base a un modelo del proceso de calibración, dando su aplicación los objetivos específicos, los fundamentos teóricos, los métodos para su realización y los criterios de éxito del mismo. Además define un ciclo de vida para el proceso de manera de establecer lo que hay que hacer en cada etapa del ciclo para alcanzar los objetivos.

El proceso de calibración de interés se enmarca en un proyecto satelital y, por lo tanto, su desarrollo debe ser coherente y consistente con el desarrollo de dicho proyecto. Se entiende por proyecto al conjunto de actividades coordinadas y controladas, que tiene un comienzo y un fin, emprendidas para crear un producto

o servicio único a fin de alcanzar un objetivo [19]. Este proyecto debe ajustarse a requerimientos específicos, incluyendo restricciones de tiempo, costo y recursos. Un proyecto crea entregables únicos, que consisten en productos, servicios o resultados.

Existen distintas metodologías para organizar y gestionar un proyecto. La adopción de una en particular depende de la organización o agencia que lleva adelante el proyecto, su experiencia y su herencia. Entre estas metodologías las más tradicionales plantean un ciclo de vida secuencial para el proyecto [19], desde el concepto y la fase de planificación hasta el desarrollo y aseguramiento de la calidad y finalmente la finalización y mantenimiento del proyecto. Los requisitos del proyecto se definen generalmente al principio, y se introducen pocas o ninguna alteración al plan previamente establecido, a menos que sea absolutamente necesario. Los riesgos e incertezas se minimizan delineando cada uno de los pasos del proceso, definiendo sus alcances, presupuestos y cronogramas previamente. De esta manera, una fase del proyecto debe ser completada con éxito para poder proceder a la siguiente.

Este tipo de metodología es la que generalmente se utiliza en el desarrollo de proyectos satelitales que, como se verá en el *Capítulo 2*, son proyectos en general estables y predecibles, basados en una minuciosa planificación. La principal desventaja de la utilización de una metodología tradicional es que resulta difícil y costoso implementar cambios en fases avanzadas del proyecto. Esto impone una carga sobre la definición de requerimientos que describen el producto que se desea obtener. En consecuencia, puede ocurrir, sobre todo en fases de desarrollo conceptual y propuestas de soluciones de diseño, que se utilicen otro tipo de metodologías, que se adapten mejor a situaciones cambiantes.

1.4 Organización del trabajo

La metodología que se propone en este trabajo resulta una guía de referencia para la planificación e implementación de la calibración en laboratorio de una cámara hiperspectral, en particular, su calibración radiométrica. En consecuencia, abarca tanto aspectos programáticos como técnicos relacionados con la calibración. Para que esta metodología sea eficiente, debe abarcar el problema considerado en su totalidad y de manera sistemática. En este sentido, cuenta con tres aportes principales que conforman su marco teórico y que se presentan en distintos capítulos del trabajo. Este marco teórico es la base que sustenta la

selección de métodos y toma de decisiones a lo largo del proceso de calibración y resulta un elemento fundamental de la metodología.

En primer lugar, en el *Capítulo 2* se describen los elementos principales y el ciclo de vida de un proyecto satelital. Se hace énfasis en las características de cada fase del proyecto, en las revisiones formales que separan cada fase y en la estructura del sistema. También se describe el proceso de definición de los requerimientos para lograr el desempeño esperado tanto del sistema como del instrumento en particular. En este mismo capítulo se describen los objetivos y características de la calibración de laboratorio o pre-lanzamiento de un instrumento que conforma la carga útil de un satélite. El propósito de este capítulo es contar con fundamentos que permitan adaptar la metodología de calibración al desarrollo de un proyecto satelital y aportar a la elaboración de un plan de calibración de laboratorio.

El *Capítulo 3* está dedicado a los fundamentos de la teledetección hiperespectral, con la intención de brindar una descripción completa del problema e identificar el rol y la importancia de la calibración radiométrica del instrumento para obtener datos útiles y de calidad. En este capítulo se presentan los elementos de la teledetección hiperespectral, la composición típica de un sistema de captura de imágenes hiperespectrales y las características de los datos que se obtienen.

En el *Capítulo 4* se realiza una revisión de antecedentes sobre caracterización y calibración de cámaras hiperespectrales, incluyendo un conjunto de mejores prácticas que han surgido en la comunidad científica y aeroespacial, a partir de las numerosas experiencias en calibración que se han realizado desde el surgimiento de la teledetección hiperespectral. Se presentan conceptos fundamentales sobre los que se trabajará, entre ellos, el concepto de calibración, estándar y trazabilidad, así como la estimación de incertezas asociadas a los procesos de medición. Estos fundamentos constituyen el aspecto técnico de la metodología de calibración.

Luego, en el *Capítulo 5* se presenta la metodología que se propone para la planificación y el control del proceso de calibración de una cámara hiperespectral. Esta metodología representa el objeto central del presente trabajo. En este capítulo se propone una estructura del proceso de calibración en laboratorio, y se describen las tareas a realizar en cada etapa del mismo, especificando roles y responsabilidades, documentación a generar y entregables, entre otros aspectos.

En el *Capítulo 6* se aplican aspectos de dicha metodología para la calibración radiométrica de la cámara VNIR que compone el sistema de captura en desarrollo en CONAE, adaptada a las condiciones particulares del caso. Se pre-

sentan resultados de la caracterización del instrumento y se describe el proceso de calibración realizado.

Por último, en el *Capítulo 7* se discuten las principales conclusiones de esta tesis y las posibles extensiones del trabajo.

2

Proyectos satelitales

En este capítulo se presentan algunos conceptos sobre el desarrollo y la organización de un proyecto satelital. El objetivo es establecer criterios generales para la organización de un proceso de calibración de una cámara hiperspectral como carga útil del satélite, de manera que este sea compatible con el desarrollo del proyecto. Por las características del instrumento, se entiende que las misiones consideradas tienen un objetivo científico y están catalogadas como de observación de la Tierra.

Se describe además el lugar que ocupa la calibración pre-lanzamiento o en laboratorio, instancia en la cual se verifica que el instrumento cumple con los requerimientos de desempeño impuestos sobre él a fin de que se satisfagan los requerimientos de misión y de ciencia. Se describen además un conjunto de lecciones aprendidas sobre calibración de instrumentos EO/IR, que resulta conveniente incorporar al momento de planificar un proceso de calibración de una cámara hiperspectral.

2.1 Elementos de una misión satelital

Una misión satelital se conforma por un conjunto de actividades necesarias para perseguir eficazmente una oportunidad científica, tecnológica o de ingeniería, directamente relacionada con una meta de la organización o institución que la lleva adelante [20]. Una misión surge como respuesta a una necesidad. El satélite no es un fin en sí mismo, sino que constituye una herramienta apropiada para cumplir con dicha meta u objetivo. Esta solución se elige cuando se

considera que sus ventajas exceden los costos de desarrollo y operación de la misión.

La implementación de una misión satelital requiere una infraestructura específica a fin de que el satélite pueda ser utilizado para cumplir con los objetivos. Esta infraestructura, a la que se denomina sistema (ver *Figura 2.1*), consta de diferentes segmentos que cumplen una función específica. Por ejemplo, el segmento terreno está formado por las estaciones terrenas, en las cuales se llevan a cabo actividades de control, mantenimiento y comunicación con el satélite.

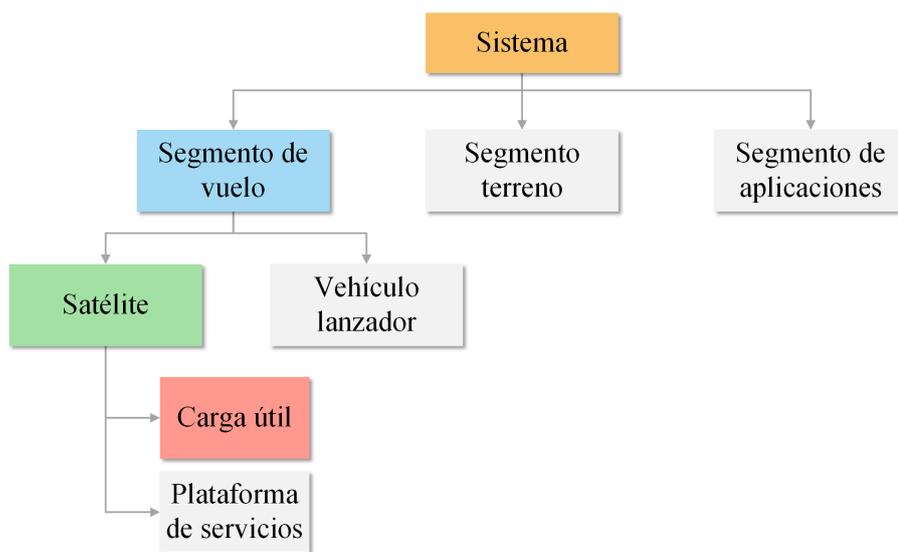


Figura 2.1. Composición de un sistema espacial. Cada uno de los segmentos aporta una funcionalidad a la misión (adaptado de [21]).

El segmento de vuelo está conformado por el sistema de lanzamiento y el satélite. Este vehículo se puede dividir a su vez en dos partes principales, la carga útil y la plataforma de servicios. La carga útil es la motivación para la misión en sí misma. A fin de garantizar la supervivencia y correcto funcionamiento de la carga útil, desde el lanzamiento hasta las operaciones del satélite, se requieren ciertos recursos que deben ser provistos por la plataforma de servicios. A tal fin, esta plataforma se subdivide en subsistemas que pueden ser de naturaleza mecánica o electrónica. Estos subsistemas se presentan de manera resumida en la *Tabla 2.1*.

Por último, se distingue un segmento de usuarios o aplicaciones que se compone del personal, equipamiento y facilidades que utilizarán la información provista por la carga útil del satélite y mediante procesamientos específicos la transformará en información útil de alto valor agregado.

Tabla 2.1. Subsistemas típicos de un satélite y su función (extraído de [22]).

Subsistema	Descripción
Determinación y control de actitud	Estabilizar el vehículo, compensando perturbaciones ambientales. Determinar su actitud y orientarlo en la dirección apropiada de acuerdo al modo de operación.
Propulsión	Permite maniobrar el vehículo para corrección y mantenimiento de la órbita. Puede asistir en el control de actitud.
Potencia	Es el encargado de generar, almacenar, distribuir y controlar la energía eléctrica del vehículo.
Comando y manejo de datos	Recibe, valida, decodifica y distribuye comandos a los subsistemas. Reúne y formatea el estado del satélite y datos de misión para ser enviados a tierra o para su uso por parte de la computadora de abordo.
Control térmico	Mantener todos los elementos que componen el vehículo dentro de sus límites de temperatura permitidos para todas las fases de la misión.
Estructura	Brinda soporte mecánico a todos los subsistemas del satélite y a la carga útil. Vincula al vehículo con el lanzador y provee resistencia a las cargas inducidas por este último durante el lanzamiento y la posterior separación del lanzador.
Comunicaciones	Es la interface entre el satélite y la Tierra, transmitiendo datos de telemetría, telecomando y rastreo.

Los satélites pueden clasificarse de acuerdo a las características de los objetivos de la misión, a su masa y al tipo de órbita en la cuál serán colocados. En la *Tabla 2.2* se resumen brevemente estas clasificaciones. Una cámara hiperespectral, por el tipo de instrumento y sus posibles aplicaciones puede conformar la carga útil en misiones científicas o de aplicación a la observación remota de la superficie terrestre, en satélites de órbita LEO.

A modo de ejemplo, la CONAE ha desarrollado y puesto en órbita hasta la fecha las misiones satelitales [23] SAC-B, minisatélite de 191 kg, una órbita seleccionada de 550 km de altitud (LEO) y objetivos científicos. Lanzado el 4 de Noviembre de 1996 en un cohete Pegasus (EE.UU.). Debido a falla en la sepa-

ración del satélite de la 3ra etapa de Pegasus salió de servicio 12 horas después del lanzamiento. SAC-A, microsatélite de 68 kg, fue lanzado el 3 de diciembre 1998 en el Transbordador Espacial (EE.UU) y finalizó sus operaciones en agosto de 1999. Su órbita tuvo una altura nominal de 389 km (LEO). La misión fue concebida como modelo tecnológico como parte de la Misión SAC-C, puso a prueba una serie de instrumentos desarrollados en el país. SAC-C, minisatélite de 485 kg, fue lanzado el 21 Noviembre del 2000 con un Delta II (EE.UU.) y finalizó sus operaciones en agosto del 2013. Su misión fue de observación de la Tierra y mediciones con fines científicos. Formó parte de la Constelación Matutina (AM) conjuntamente con los satélites de NASA Landsat-7, EO-1 y Terra. SAC-D/Aquarius, satélite grande de 1600 kg, lanzado el 10 de junio de 2011 con un Delta II (EE.UU.), finalizó sus operaciones en junio del 2015. Su misión era la de observación del océano, el clima y el medio ambiente desde una órbita heliosincrónica de 657 km de altitud (LEO).

Por otro lado, se encuentran además en desarrollo las misiones SABIA-Mar [24], concebida como una misión de Observación de la Tierra con aplicaciones prioritarias en el estudio del mar y costas. La puesta en órbita del SABIA-Mar 1 está prevista para el año 2020. Y la misión SAOCOM [24], satélites de Observación de la Tierra es la medición de la humedad del suelo y aplicaciones en emergencias. Es un proyecto desarrollado en colaboración con la Agencia Espacial Italiana (ASI) e integra de manera operacional, junto con los satélites italianos COSMO-SkyMed, el SIASGE (Sistema Ítalo-Argentino de Satélites para Gestión de Emergencias). Su órbita será heliosincrónica de 620 km de altitud.

Otros ejemplos de satélites desarrollados en Argentina incluyen a Pehuensat-1, nanosatélite con objetivos educativos construido totalmente en la Argentina y lanzado el 10 de enero de 2007. El armado demandó cinco años y fue realizado por investigadores de la Universidad Nacional del Comahue. El satélite pesa 6 kg y recorre la órbita a unos 640 km de altura.

SAT-1 Víctor fue el primer satélite concebido, diseñado, calificado e integrado en Argentina. Se trató de un satélite experimental con fines educativos y como demostrador tecnológico. Fue llamado Víctor una vez en órbita en homenaje al ingeniero Víctor Aruani, integrante del equipo, fallecido antes de terminar el proyecto. Desarrollado en el Centro de Investigaciones Aplicadas del Instituto Universitario Aeronáutico de Córdoba y lanzado el 29 de agosto de 1996.

Los nanosatélites Cube-Bug fueron realizados con tecnología argentina. Es un desarrollo nacional financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva y concebido, diseñado y producido por la empresa Satellogic

(www.satellologic.com) en colaboración con INVAP , entre otros.

Tabla 2.2. Clasificación de satélites de acuerdo a su masa, órbita y misión (extraído de [25]).

Parámetro	Clasificación
Masa	<ul style="list-style-type: none"> » Grande ($> 1000kg$) » Mediano ($500 - 1000kg$) » Minisatélite ($100 - 500kg$) » Microsatélite ($10 - 100kg$) » Nanosatélite ($1 - 10kg$) » Picosatélite ($0,1 - 1kg$) » Femtosatélite ($< 0,1kg$)
Órbita	<ul style="list-style-type: none"> » LEO hasta 2000km de la superficie terrestre » MEO desde 2000km hasta una altitud por debajo de la geosincrónica. » GEO a 38500km y tienen un período de 24hs » HEO alturas superiores a 35800km
Misión	<ul style="list-style-type: none"> » Científicas » Aplicaciones: observación, comunicaciones, navegación (GPS, Glonass, Galileo), militares. » Tecnológicas » Combinadas (estación espacial)

2.2 Ciclo de vida de un proyecto satelital

Un proyecto satelital consiste en todas las actividades que se emprenden con el fin de implementar la misión y alcanzar sus objetivos. El desarrollo de un proyecto satelital se realiza usualmente en base a un conjunto de buenas prácticas, incluidas en manuales, normas y estándares que cada agencia espacial o institución elabora o adopta para tal fin. Estas normas son guías de referencia para la realización de las diferentes tareas. A modo de ejemplo, existen normas que brindan pautas para el desarrollo de la tarea de ingeniería del sistema [25], la verificación de requerimientos [26,27], o reglas generales que favorecen el éxito de la misión [28]. El objetivo de esta estandarización es minimizar el costo del ciclo de vida del proyecto, al tiempo que se mejora la calidad, la integridad funcional y la compatibilidad de todos los elementos del mismo.

Los proyectos satelitales pueden variar en alcance, complejidad y costo, pe-

ro todos comienzan por la maduración de un concepto. Este concepto permite establecer los objetivos a partir de los cuales se elaboran los requerimientos a cumplir por el sistema para alcanzarlos. Estos requerimientos son los que guían el proceso de diseño, fabricación y ensayo del sistema.

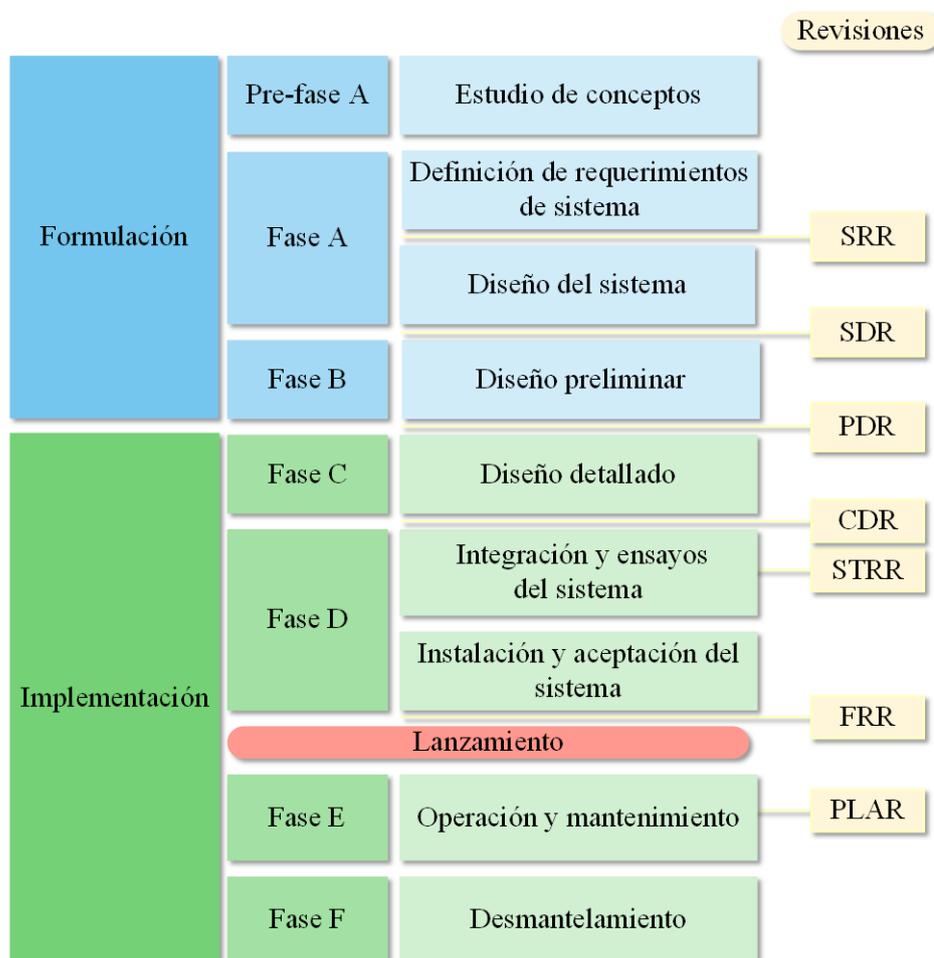


Figura 2.2. Ciclo de vida típico de un proyecto satelital, fases y revisiones más relevantes, de acuerdo a NASA [25]. SRR: *System Requirements Review*; SDR: *System Design Review*; PDR: *Preliminary Design Review*; CDR: *Critical Design Review*; STRR: *System Test Readiness Review*; FRR: *Flight Readiness Review*; PLAR: *Post-Launch Assessment Review*.

Un proyecto satelital se divide generalmente en fases durante las cuales se desarrollan actividades específicas. Estas fases se separan entre sí por instancias de evaluación y control del avance del proyecto, que permiten decidir si el mismo alcanzó el estado de madurez y desarrollo planeado para esa instancia, de tal forma que dicho proyecto pueda progresar a la siguiente fase.

Cada una de estas instancias, asociadas a revisiones formales del proyecto, marcan una base a partir de la cual se continúan desarrollando las fases subsi-

guientes. En estas revisiones se captura una descripción completa del sistema, incluyendo requerimientos, diseños o documentos que a lo largo del proyecto sufren cambios controlados a través de un proceso formal de aprobación y gestión de configuración. Estas revisiones constituyen herramientas orientadas a asegurar que todo el equipo está trabajando con los mismos requerimientos, diseños, restricciones, supuestos, interfaces y asignaciones de recursos y responsabilidades.

La descomposición del proyecto en fases permite organizarlo en partes más reducidas que pueden ser gestionadas con mayor facilidad. En la *Figura 2.2* se puede apreciar la estructura utilizada por NASA para sus proyectos espaciales, así como las revisiones más importantes. A continuación, y en las siguientes secciones, se muestra a modo de ejemplo el abordaje de NASA al desarrollo de un proyecto satelital, de acuerdo a lo consignado en el *NASA System Engineering Handbook* [25].

En la etapa de formulación, que incluye la Pre-fase A y las Fases A y B, se debe alcanzar la madurez suficiente en la planificación para desarrollar e integrar la definición técnica inicial con el presupuesto y cronograma asociado, identificando claramente los riesgos asociados con esa definición técnica, con el presupuesto asignado y con el cronograma de ejecución definido.

En la Pre-fase A se lleva a cabo un estudio de factibilidad del sistema que se pretende desarrollar, explorando distintos conceptos de misión, estableciendo posibles necesidades tecnológicas y definiendo requerimientos preliminares de sistema, los cuales en esta instancia aún son negociables. Las actividades más relevantes de esta fase incluyen: identificar y evaluar misiones y arquitecturas, identificar e involucrar usuarios y partes interesadas, identificar requerimientos de misión, ciencia y sistema de alto nivel, preparar propuestas de proyectos que pueden incluir justificación y objetivos de la misión, conceptos de operaciones posibles, identificación de tareas a realizar en una WBS de alto nivel (este concepto se desarrolla en la *Sección 2.6*), estimaciones de costo, cronograma y riesgos y valoración de necesidades tecnológicas y su estado de madurez.

Al final de esta fase, y si se alcanzan los criterios preestablecidos para la evaluación de la misma, se realiza generalmente una revisión denominada MCR, *Mission Concept Review*. Como resultado de esta fase se obtienen conceptos del sistema que resultan factibles, en forma de modelos, simulaciones y análisis.

En la Fase A, de desarrollo conceptual, se determina la viabilidad del sistema propuesto, se definen el concepto de misión, los requerimientos a nivel sistema y los desarrollos tecnológicos que serán necesarios. Las actividades a realizar incluyen: elaborar el plan del proyecto, establecer requerimientos y restricciones de

alto nivel, definir y documentar requerimientos de sistema y de interfaces internas y externas. También se debe demostrar que existe un diseño verosímil y factible, desarrollar la arquitectura de la misión, definir la WBS, preparar e iniciar el plan de gestión de riesgos, elaborar los planes de control de configuración, de gestión de datos y de seguridad y aseguramiento de misión, definir el abordaje de V&V (verificación y validación) y documentar el plan de V&V.

El resultado de esta fase se compone de simulaciones, análisis, modelos de ingeniería y un estudio de compromisos entre necesidades técnicas, cronograma y costo, así como la identificación de riesgos y la definición de una estrategia para su gestión. Las revisiones que usualmente se realizan para evaluar el estado de avance del proyecto y la conveniencia de continuar hacia la siguiente fase son: SRR, *System Requirement Review*, en la cual se evalúan los requerimientos preliminares, que si resultan aprobados, quedan congelados y PMSR, *Preliminary Mission and System Review*, en la cual se debe demostrar que el concepto de la misión es factible y permite cumplir con sus objetivos.

Durante la Fase B de diseño preliminar, se debe contar con un diseño del sistema lo suficientemente detallado como para demostrar que este puede cumplir con los requerimientos de la misión. Entre las actividades a realizar se encuentran: revisar y actualizar documentación generada durante la Fase A, desarrollar el plan de operaciones, actualizar planes de control de contaminación, de control de confiabilidad, de control de calidad y el plan de gestión de piezas. También se debe actualizar el plan de gestión de riesgos, la información de costo y cronograma, finalizar y aprobar los requerimientos de alto nivel y realizar la derivación a requerimientos de nivel inferior. En esta etapa se debe además seleccionar una solución básica de diseño, esbozar el reporte del diseño preliminar y definir soluciones de diseño de interfaces internas y externas y definir las operaciones del sistema.

Como producto de esta fase se obtienen resultados del estudio de compromisos, especificaciones, documentos de interfaces y prototipos. A fin de avanzar a la siguiente fase, y si todos los criterios para la realización de la revisión formal se cumplen, se realiza un PDR, *Preliminary Design Review*.

En la etapa de implementación se distinguen dos fases. La Fase C es una fase de diseño final y fabricación, durante la cual se finaliza el diseño detallado del sistema y los correspondientes subsistemas (incluidas las operaciones del sistema), se fabrica el *hardware* y se desarrolla el *software*. En esta fase corresponde: actualizar documentos de interfaces, actualizar el plan de operaciones, actualizar los planes de ingeniería como el plan de control de contaminación, de control

de confiabilidad, de control de calidad y el plan de gestión de piezas. También se genera documentación a fin de demostrar la madurez del sistema, incluyendo arquitectura del sistema, WBS y planes del proyecto. Se debe también actualizar los planes de producción, refinar los procedimientos de integración, incluir las especificaciones de diseño de bajo nivel a la arquitectura del sistema, completar los procedimientos de fabricación y ensamblaje, mantener los documentos de requerimientos y planes de V&V y desarrollar los procedimientos de V&V. Se debe también desarrollar el plan de integración del sistema y preparar el plan de operaciones para el sitio de lanzamiento.

Cualquier cambio en los requerimientos en esta fase puede resultar costoso y requiere un estudio de compromisos que lo fundamente. Al finalizar esta fase, y si todos los criterios establecidos para la revisión de la misma se cumplen, se realizan varias revisiones, entre ellas la más relevante es la CDR, *Critical Design Review*.

En la Fase D se realizan el ensamblaje y la integración del sistema, así como los ensayos necesarios para generar confianza en que el mismo satisface los requerimientos. Entre otras actividades, en esta fase corresponde: integrar y ensayar de acuerdo al plan de integración y verificación, refinar los procedimientos de V&V en todos los niveles, realizar V&V de aceptación del sistema, realizar ensayos ambientales del sistema, documentar lecciones aprendidas, entrenar operadores iniciales del mismo, confirmar que los elementos que lo componen y los de soporte están listos para el vuelo. También se realiza la integración con el vehículo lanzador, el lanzamiento, la inserción orbital, el despliegue del sistema y la verificación y validación de operaciones iniciales.

En esta fase se realiza la preparación final para el lanzamiento y las operaciones, además de varias revisiones de importancia, como la TRR, *Test Readiness Review*, la ORR, *Operation Readiness Review* y LRR, *Launch Readiness Review*.

En la etapa de explotación, compuesta por la Fase E de operaciones y mantenimiento, se desarrolla la misión propiamente dicha. Las actividades a llevar a cabo incluyen: realizar una valoración de desempeño en el lanzamiento, realizar la verificación en órbita de la nave, poner en servicio y activar instrumentos, entrenar el personal involucrado en operaciones y mantenimiento, mantener y aprobar los registros de operaciones, mantener y actualizar el sistema, abordar reportes de problemas o fallas, procesar y analizar los datos de misión, completar los reportes post-vuelo y de misión y preparar la desactivación y desmantelamiento.

Durante esta fase se realiza una revisión que valora el estado del sistema luego del lanzamiento, denominada PLAR, *Post Launch Assessment Review*.

Por último, se realiza la Fase F en la cual se realiza la terminación de la misión y el desmantelamiento del sistema. En esta fase se documentan lecciones aprendidas y se realiza el reporte final de la misión y el archivo de datos y disposición del sistema y procesos de soporte.

Dado que las decisiones tomadas en etapas tempranas del proyecto afectan etapas posteriores y que los proyectos más maduros son más difíciles de cambiar, la planificación temprana de las actividades tiene un gran impacto en el éxito de la misión. En este sentido, es conveniente dedicar esfuerzos a una definición detallada y correcta de los requerimientos que luego guiarán el diseño del sistema.

2.3 Definición de requerimientos

El diseño de un sistema espacial consta en general de cuatro procesos interdependientes, altamente iterativos y recursivos cuyo resultado final es un conjunto de requerimientos validados y una solución de diseño validada que satisfacen las expectativas de las partes interesadas. Estos procesos consisten en: la identificación de expectativas de las partes interesadas y elaboración de objetivos de la misión; la definición de requerimientos técnicos; la descomposición lógica y la solución de diseño.

Los objetivos de la misión son impuestos por el cliente, las partes interesadas o los usuarios. Son enunciados del propósito de la misión, de naturaleza cualitativa y deben ser suficientemente generales como para mantenerse sin cambios durante el proceso de diseño. Luego de un proceso creativo estos objetivos derivan en un conjunto de requerimientos cuantitativos que describen el desempeño de cada elemento del sistema que puede cumplir con los objetivos de la misión. Para que estos requerimientos sean efectivos deben vincularse de manera lógica con los requerimientos de misión y sistema de más alto nivel, y con los requerimientos de subsistemas de nivel inferior. La *Figura 2.4* muestra cómo se establece la jerarquía de requerimientos. Es importante notar las flechas en dos sentidos que indican la retroalimentación y la naturaleza iterativa del proceso de establecer los requerimientos de las distintas partes del sistema.

Las necesidades, requerimientos y restricciones dependen de cada misión y de la manera en que se decide implementarla. La primera estimación de los requerimientos proviene de los objetivos y el alcance de la misión combinados con alguna idea de lo que es factible. En algunos casos se puede volver a iterar sobre la definición de requerimientos y modificarlos un poco, a medida que se

avanza en el proceso de diseño del concepto de misión.

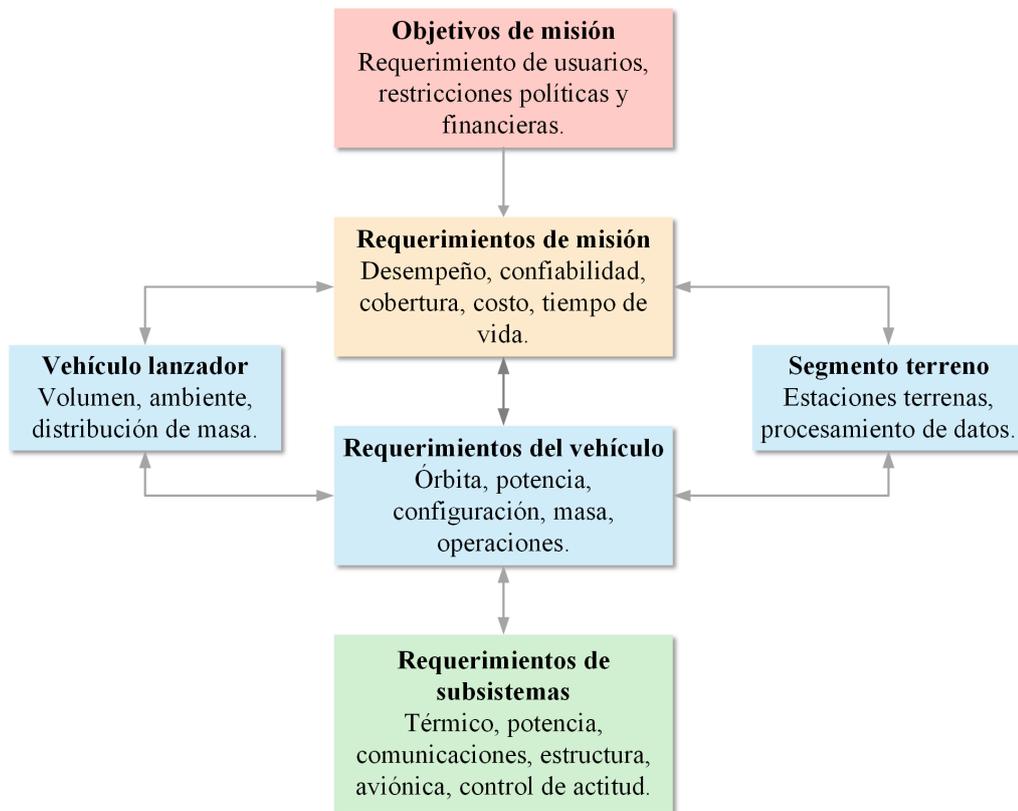


Figura 2.3. Relación entre objetivos de la misión y requerimientos de cada segmento (adaptado de [21]).

En la *Tabla 2.3* se resumen los aspectos más importantes a tener en cuenta para la definición de requerimientos. Esta definición involucra a su vez dos procesos distintos pero interrelacionados: un proceso guiado por una misión y un cliente, para definir los objetivos y relacionarlos con los requerimientos de alto nivel, y con requerimientos detallados del sistema y los subsistemas; y un proceso analítico que distribuye requerimientos en elementos constitutivos creando presupuestos de error, presupuestos de desempeño y de costo, que permiten dar seguimiento al proceso y garantizan que los objetivos se cumplan.

Los requerimientos de sistema son entonces una expresión cuantitativa de un abordaje para cumplir con los objetivos de la misión (ver *Tabla 2.3*). Estos requerimientos se registran en un conjunto de documentos de especificaciones del sistema. Los documentos de requerimientos deben ser consistentes con los documentos del proyecto, completos en relación con la madurez del sistema en desarrollo y trazables con los requerimientos y especificaciones de alto nivel de

misión y sistema. Debe además posible derivarlos a requerimientos y especificaciones de menor nivel (subsistemas).

Tabla 2.3. Características, tipos y elementos a ser documentados para cada requerimiento (adaptado de [21]).

Requerimientos de sistema o subsistema
<p>Deben estar basados en objetivos de misión, en relación con la carga útil o derivados de otros requerimientos de más alto nivel.</p> <p>Deben pasar por un estudio de compromisos del sistema.</p> <p>Deben explicitar lo que se debe hacer.</p> <p>Son expresiones cuantitativas de qué tan bien se cumplen los objetivos, deben ser registrados en especificaciones del sistema.</p>
Tipos de requerimientos
<p>Funcionales: definen lo que el sistema debe hacer.</p> <p>Performance: definen qué tan bien debe hacerlo.</p> <p>Operacionales: determinan cómo opera el sistema y cómo los usuarios interactúan con él para satisfacer sus necesidades específicas.</p> <p>Restricciones: limitan costo, cronograma, técnicas de implementación disponibles para el diseñador.</p> <p>Interfaces: definen las uniones mecánicas y electrónicas entre componentes o subsistemas y sus características.</p> <p>Ambientales: describen el ambiente que debe ser capaz de soportar el satélite.</p>
Elementos que deben ser documentados
<p>Función: qué debe hacer</p> <p>Desempeño: qué tan bien debe hacerlo.</p> <p>Verificación: inspección, ensayo o análisis.</p> <p>Razón: por qué es requerido.</p>

Entre los requerimientos de tipo funcional se pueden identificar aquellos que explicitan la dirección en que debe apuntar la carga útil, el tiempo de vida esperado o la manera y frecuencia en que los datos que genera deben ser comunicados a la estación terrena. La implementación de estos requerimientos es una de las razones por las que resulta conveniente la subdivisión del vehículo en los subsistemas anteriormente descritos en la *Tabla 2.1*.

En la *Figura 2.4* se puede apreciar la interrelación entre requerimientos de distintos segmentos del sistema. Mientras que en el caso de la plataforma de servicios, los requerimientos enuncian las características de los subsistemas que garantizan la supervivencia y operatividad del vehículo, desde el lanzamiento hasta su puesta en órbita y operación, los requerimientos de ciencia enuncian el desempeño necesario de la carga útil para realizar las mediciones que permitirán cumplir con los objetivos de la misión.

Sin embargo, no es sólo la naturaleza de la carga útil lo que determina el diseño seleccionado para una determinada misión, aunque esta tiene una considerable influencia. Existe otro factor que afecta el diseño y este es la confiabilidad del sistema. A diferencia de los sistemas terrestres o aerotransportados, que pueden recibir mantenimiento continuo, los sistemas en el espacio no pueden recibir estas prestaciones. Esto requiere que el sistema sea tolerante a fallas. Cuando esta tolerancia es excedida, el sistema ya no es operable y la misión finaliza. El efecto de diseñar para obtener alta confiabilidad es que el diseño resulta conservativo. Otro factor que aporta a la confiabilidad del sistema es la posibilidad de verificar que los requerimientos se cumplen.

Como parte de la definición de requerimientos es necesario establecer de qué manera estos deben ser verificados. En este contexto, verificar implica demostrar que el producto cumple con los requerimientos correspondientes (funcionales, de desempeño o ambientales). Estas demostraciones pueden realizarse por medio de análisis, inspección, demostración o ensayos. Por otro lado, los requerimientos deben además atravesar un proceso de validación, en el cual se muestra que el producto cumple el propósito previsto y que responde a las expectativas de las partes interesadas.

Este proceso de definición de requerimientos determina el costo y la complejidad del sistema. De manera que este proceso es la parte de la ingeniería de la misión que más influencia el desempeño del sistema, su costo y los riesgos asociados. En consecuencia, para producir un sistema de bajo costo y más efectivo es necesario ser tan cuidadoso en la definición de los requerimientos que lo describen como en el diseño del sistema que cumple con estos requerimientos.

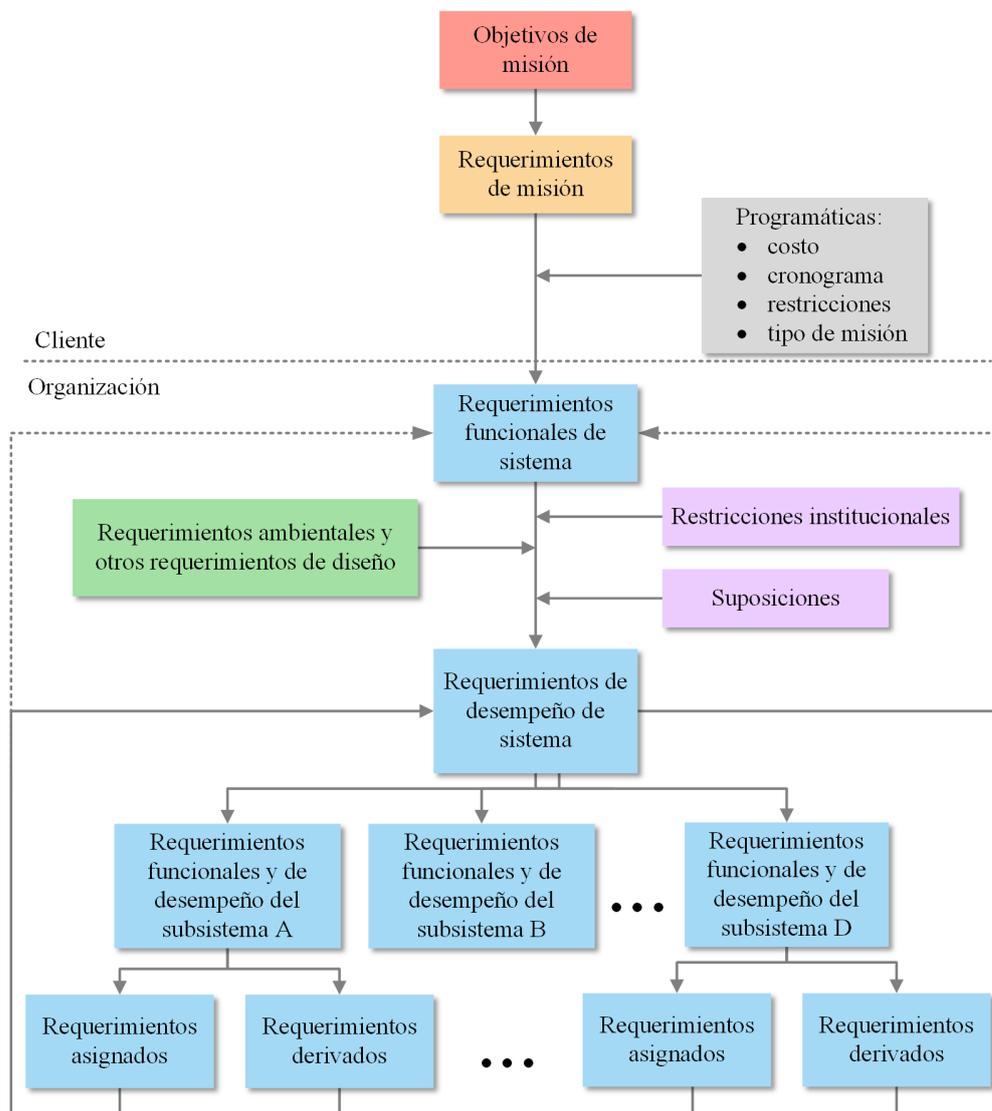


Figura 2.4. Flujo de requerimientos de una misión satelital, desde los objetivos de la misión hasta los requerimientos de subsistemas (adaptado de [21]).

2.4 Verificación de requerimientos

Una instancia importante en el desarrollo del proyecto es la verificación del sistema. En esta sección se presenta una breve descripción del proceso, comenzando por la definición de algunos conceptos que serán mencionados más adelante. El ensamblaje es el proceso de unir mecánicamente componentes de *hardware*. La integración implica combinar física y funcionalmente distintos componentes, de

manera controlada y secuencial. En este proceso es necesario comprobar que las interfaces, mecánicas y electrónicas, sean adecuadas, de manera que el conjunto funcione correctamente.

La verificación es el proceso mediante el cual se demuestra que se cumple con los requerimientos funcionales y de desempeño, de acuerdo a lo aprobado en revisiones de requerimientos (SRD, por ejemplo). Es decir, verificar un componente, ensamble o subsistema implica confirmar que este ha sido fabricado en conformidad con sus especificaciones y descripción de diseño. El tipo de verificación a realizar (ver *Tabla 2.4*) depende de la fase del proyecto y el lugar que ocupa el dispositivo a verificar. En consecuencia, puede darse en distintos niveles de ensamblaje (sistema, subsistema, componente, etc.). Siempre que sea posible, se recomienda una verificación por ensayo, aunque este método no es siempre práctico o cubre todos los escenarios y condiciones posibles de la misión. En consecuencia, se pueden combinar varios métodos a fin de generar evidencia para confirmar que cada componente, ensamble o subsistema del sistema cumple con los requerimientos impuestos sobre él.

La verificación puede tener dos objetivos: la calificación, es decir, demostrar que el diseño es completamente capaz de cumplir con todos los requerimientos en niveles que exceden los establecidos por dichos requerimientos, con márgenes apropiados; la aceptación, que permite demostrar que el componente está libre de defectos del material o de *workmanship* (derivados de métodos utilizados o por mano de obra no adecuados) y que no se han introducido fallas durante el ensamblaje y la integración.

La verificación se realiza generalmente a niveles de subsistema, unidad o componente por varias razones [29]. En primer lugar, porque permite detectar anomalías, fallas y defectos en etapas tempranas del programa de verificación, para poder realizar modificaciones y rectificaciones que las resuelvan. Además, los acuerdos contractuales generalmente demandan que el proveedor de una unidad o equipo demuestre y documente que el dispositivo funciona correctamente al momento de entregarlo. Por último, el ensayo de items más pequeños es más fácil y menos costoso, ya que no siempre se dispone de instalaciones de ensayo suficientemente grandes para ensayar el satélite completo.

El diagrama que de la *Figura 2.5* muestra la relación entre el proceso de planificación y la documentación necesaria para dar por finalizado un plan de verificación [29]. Desde el comienzo del proceso se analizan los requerimientos para identificar aquellos que más afectan los costos y tiempos del proceso. A partir de estos se prepara un programa de verificación en la cual se listan todos

los requerimientos. Para cada uno se debe decidir: cómo será verificado, en qué nivel (calificación o aceptación) y dónde se realizará la verificación.

La verificación de requerimientos puede en general describirse como un proceso que se compone de cinco pasos [25]: planificación, preparación, implementación de la verificación, análisis de resultados y registro del producto de la verificación.

Tabla 2.4. Descripción de los distintos métodos utilizados para la verificación de requerimientos [25, 29].

Tipo	Descripción
Análisis	Cuando la verificación no puede realizarse por medio de un ensayo, se pueden utilizar modelos matemáticos, simulaciones y técnicas analíticas para predecir si la solución de diseño es adecuada. Se usa generalmente en caso de no disponer de prototipos, de modelos de ingeniería o del dispositivo mismo.
Revisión de diseño	Implica revisar reportes de diseño, descripciones técnicas y planos de ingeniería junto con evidencia de validación de los procesos que contribuyeron a la realización de dichos documentos, para mostrar que se cumplen los requerimientos.
Inspección	Involucra generalmente una examinación visual del producto.
Ensayo	Obtención mediante pruebas con el dispositivo, un prototipo o modelo, de datos que permiten verificar su desempeño o proveer información que permita la verificación mediante análisis. En este caso, se producen datos en condiciones controladas y es el tipo de verificación que más recursos requiere.

La planificación de cualquier proceso de verificación debe comenzar en etapas tempranas del proyecto. En particular, los pasos de planificación y preparación para la verificación implican la selección de un método o una combinación de métodos que se consideren adecuados de acuerdo a las especificaciones del elemento a verificar, la fase del proyecto, el costo, el tiempo, los recursos necesarios y el lugar que ocupa el elemento en el sistema.

Se debe además establecer las condiciones y el ambiente en que se llevará a cabo la verificación, lo cual impone condiciones sobre las instalaciones, los instrumentos, los equipos de soporte y los recursos necesarios. Estos elementos, junto con criterios que permitan determinar el éxito o fracaso de la verificación, se documentan en especificaciones que además establecen en forma clara los objetivos, el alcance y los requerimientos que se desea verificar.

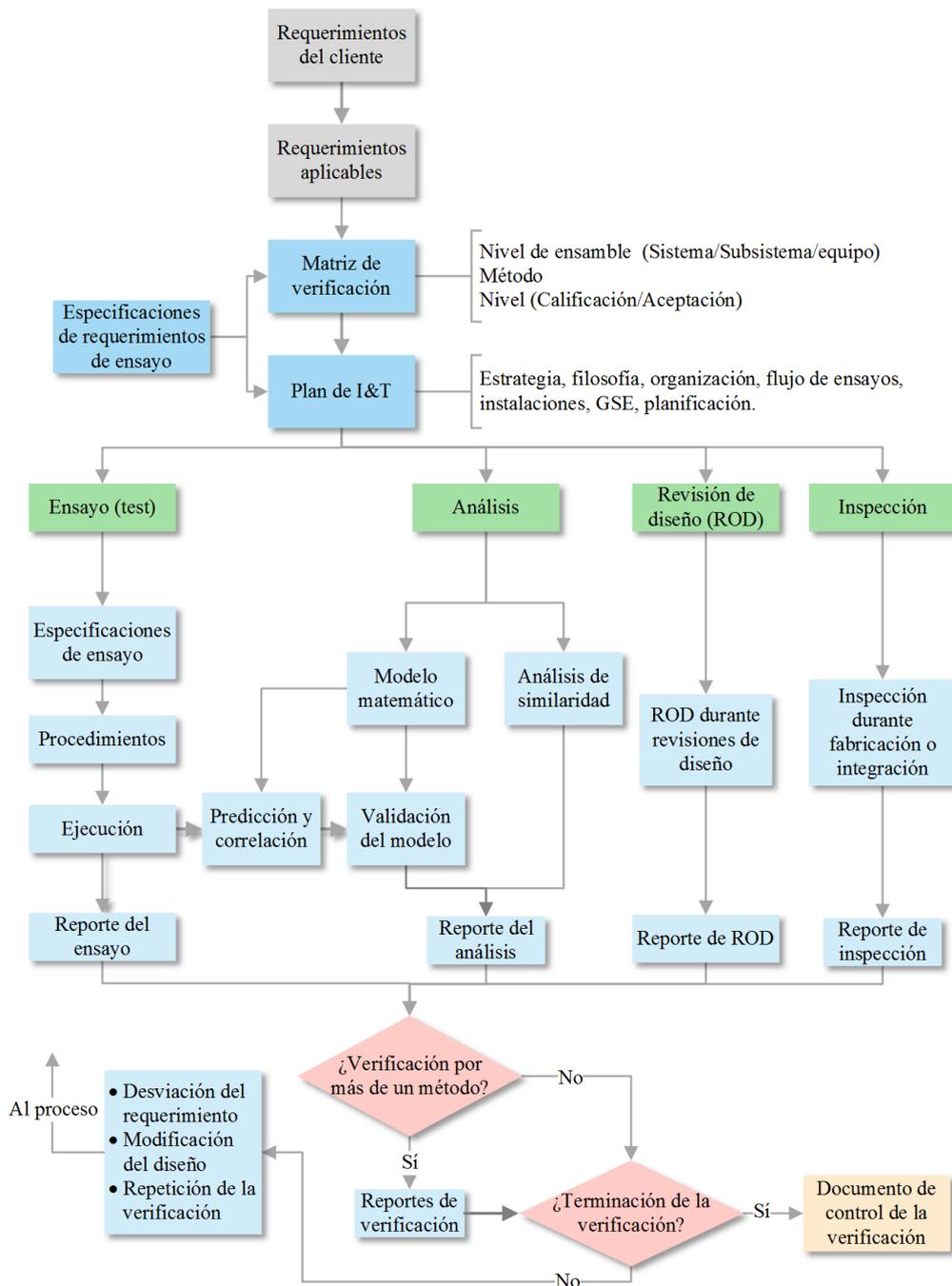


Figura 2.5. Lógica de la planificación de la verificación (adaptado de ECSS-E-ST-10-20-C [27]).

La implementación de la verificación requiere previamente la elaboración de procedimientos detallados que describan paso a paso las tareas a realizar para la verificación. Estos procedimientos se elaboran principalmente en base al dispositivo cuyos requerimientos se busca verificar, a los métodos seleccionados, el propósito y objetivo de la verificación y la configuración y condiciones ambientales en que se realizará la verificación.

La ejecución de la verificación en sí misma se realiza siguiendo los planes y procedimientos. Cualquier variación debe ser adecuadamente registrada. Como resultado de la verificación se cuenta con evidencia objetiva de que el dispositivo cumple con los requerimientos. Esta evidencia se obtiene a partir de los resultados de las pruebas. Los resultados de la verificación se registran en un reporte. Si estos resultados dieran evidencia de que uno o más requerimientos no se cumplen o se cumplen parcialmente, surge la necesidad de decidir qué hacer: asentar la desviación del requerimiento, realizar modificaciones al diseño a fin de cumplir con el mismo o repetir la verificación. Esta decisión se basa principalmente en un estudio de los riesgos que se corren al no cumplir con el requerimiento, cómo se ve afectado el desempeño del sistema y los costos que conlleva el rediseño o la repetición de la verificación. Este estudio se realiza en base a un análisis crítico de los resultados de la verificación.

2.5 Calibración pre-lanzamiento

Como parte del vehículo espacial o satélite, los instrumentos que componen la carga útil tienen su desempeño regido por requerimientos que expresan cuantitativamente qué deben hacer y qué tan bien deben hacerlo. Estos requerimientos impuestos al instrumento se derivan principalmente de aquellos de la misión y de ciencia, aunque es esperable que los requerimientos ambientales condicionen su selección o diseño.

Así como puede definirse un ciclo de vida para el proyecto satelital, es posible describir un ciclo de vida para los instrumentos que conforman la carga útil del satélite. En la *Figura 2.6* se puede apreciar un ciclo de vida típico de un instrumento a lo largo de las distintas fases del proyecto [17].

La calibración en laboratorio, o calibración pre-lanzamiento, es una de las últimas actividades a realizar con el instrumento antes de entregarlo para su integración y ensayo con el vehículo espacial. Teniendo esto en cuenta, es importante contar por un lado con suficiente evidencia de que el instrumento cumple con los

requerimientos que describen el desempeño esperado del mismo. La verificación de algunos de estos requerimientos forma parte de los objetivos de la calibración.

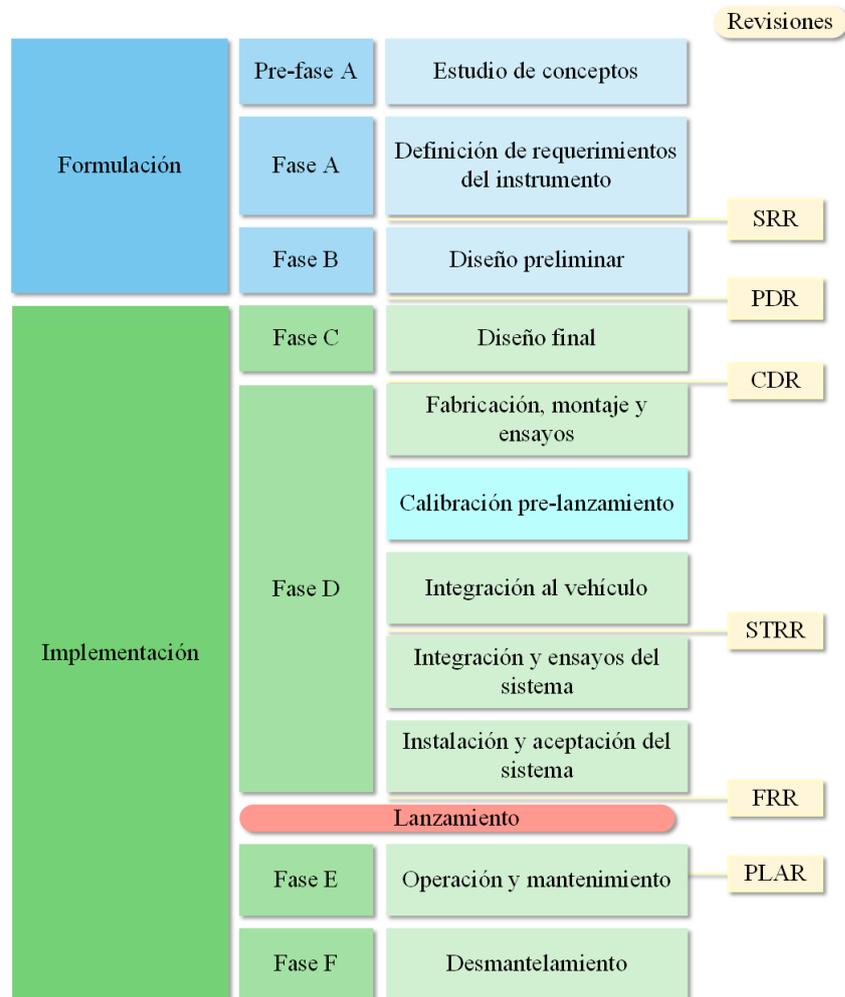


Figura 2.6. Ciclo de vida del instrumento dentro de un proyecto satelital [17]. En este diagrama se distingue el lugar que ocupa la calibración en laboratorio.

Una vez en órbita, las tareas de mantenimiento resultan imposibles, y algunas experiencias de caracterización del desempeño del instrumento y calibración son costosas en términos de los recursos que se necesitan para realizarlas. Por lo tanto, es importante que la caracterización en laboratorio sea lo más exhaustiva posible, sin agotar el instrumento o degradar su funcionamiento, en caso de que las pruebas se realicen sobre el dispositivo que volará en el satélite. Es aconsejable que estas pruebas se extienda a aspectos que cubran eventuales fallas para hacer posible salvar algunas de ellas y extender la vida útil del instrumento dentro de la misión. Además, es conveniente plantear una caracterización del instrumento tanto a nivel componentes como a nivel sistema.

Por otro lado, es conveniente contar con un conocimiento detallado del funcionamiento del instrumento, que brinde confianza en su desempeño, considerando las condiciones ambientales de operación durante la fase de explotación. En este sentido, la calibración en laboratorio del instrumento es la instancia adecuada para adquirir ese conocimiento. Este proceso de caracterización del instrumento comienza desde el momento mismo de su diseño, y debe ser contemplado en la planificación.

Las lecciones aprendidas a partir de numerosas experiencias de calibración de instrumentos EO/IR establecen elementos en común entre experiencias de calibración exitosas. Entre ellos se distinguen:

- para que la calibración en laboratorio sea exitosa, debe ser planificada desde fases tempranas del proyecto [17];
- es conveniente comenzar el proceso de calibración mediante la definición de los requerimientos de misión y calibración adecuados, para luego realizar una caracterización y modelado del instrumento [30];
- es conveniente una calibración a nivel sistema, en condiciones ambientales similares a las de operación variando todos los factores que pueden afectar el desempeño del instrumento y seleccionando estándares apropiados [16];
- es conveniente identificar fuentes de error a fin de elaborar un presupuesto de incertezas. Es importante desarrollar un modelo de error adecuado [16];
- realizar una inspección de los resultados mientras se realizan las mediciones para la calibración, a fin de detectar problemas y solucionarlos antes de romper la configuración de medición [17];

2.6 Alcance de un proyecto y organización del trabajo

Para implementar el sistema que permite alcanzar los objetivos propuestos para la misión, es necesario realizar distintas tareas de manera organizada, sistemática y coordinada. Como se describió anteriormente, estas tareas incluyen el diseño, análisis, desarrollo y fabricación de las distintas partes del sistema, así como la integración del mismo y verificación de su desempeño. Adicionalmente, se deben realizar tareas de gestión, control e ingeniería de sistema que permiten integrar las distintas partes en un sistema, atendiendo a las restricciones, tiempos y costos establecidos para la misión. Esto lleva al desarrollo de un proyecto, el cual es administrado y controlado por un Jefe de Proyecto.

El alcance del proyecto se refiere al trabajo total que debe realizarse para arribar al producto final, con las características y funciones definidas en los requerimientos [20]. A fin de facilitar la ejecución de este trabajo, es conveniente descomponerlo de manera jerárquica, lo cual lleva a la elaboración de una WBS (*Work Breakdown Structure*), al diccionario de la WBS y a la estructura organizativa del proyecto que mejor se adapta al trabajo que debe realizarse, identificando las funciones, roles y actividades requeridas por el alcance.

Como se mencionó anteriormente, la WBS debe elaborarse en fases iniciales del proyecto, contemplando tanto el trabajo a realizar dentro de la organización como fuera de ella (contribución internacional, trabajos a contratar, tareas a realizar a través de convenios). Esta WBS se actualiza a medida que surgen cambios en el contenido técnico y programático del desarrollo del proyecto. Toda actividad no contemplada dentro de la WBS puede considerarse fuera del proyecto. De esta manera, se facilita la colección de información y determinación del estado de avance de un proyecto para fines gerenciales.

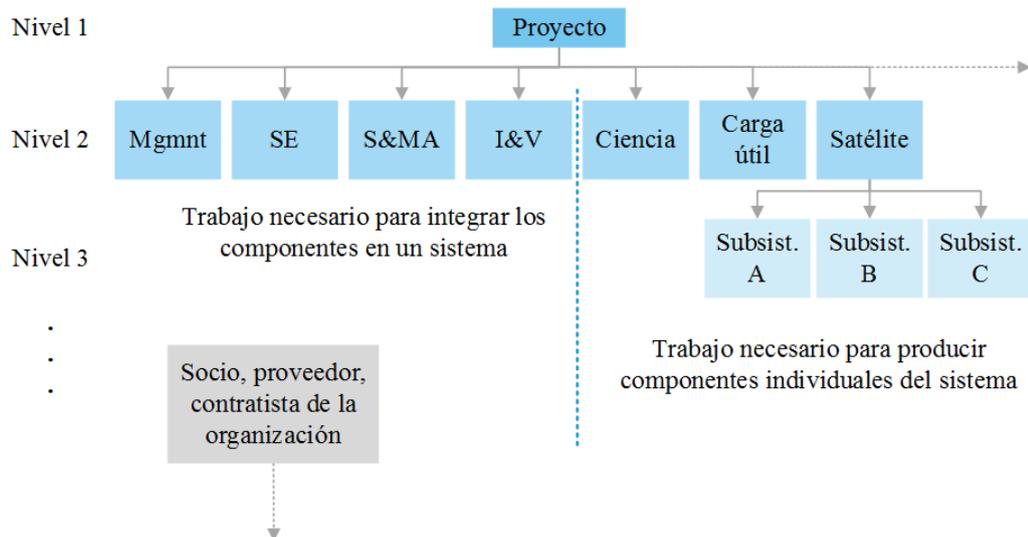


Figura 2.7. Ejemplo de una WBS genérica, en la cual se distinguen distintos elementos o paquetes de trabajo. Referencias: Mgmnt: *management* o gerencia; SE: ingeniería de sistema; S&MA: *Safety and Mission Assurance*; I& V: integración y verificación.

La WBS es un árbol que presenta distintos niveles (ver *Figura 2.7*), orientado a la generación de un producto, que identifica hardware, software, servicios y todos los otros entregables requeridos para cumplir con los objetivos del proyecto. Si hay contratistas principales, entonces ellos subdividirán la WBS hacia abajo hasta el nivel que requieran para completar su esfuerzo, con la concurrencia del

Jefe de Proyecto.

La WBS debe integrarse con la estructura organizativa del proyecto, de manera de poder asignar responsables del gerenciamiento de cada paquete de trabajo. Estos responsables deben administrar y controlar el alcance, el cronograma, la ejecución y el presupuesto del trabajo asignado.

La división del trabajo contenido en la WBS debe llegar al nivel que permita el control y gerenciamiento de todos los elementos identificados, los cuales deben contar con una definición precisa del trabajo que debe realizarse. Esta información se incluye en el diccionario de la WBS, en el cual se describe el título, identificación, objetivo, descripción del trabajo y dependencias con otros elementos de la misma WBS. Este diccionario describe completamente los productos y/o servicios que se esperan de cada elemento de la WBS.

2.7 Algunos comentarios sobre cronograma, costo y riesgos

El desarrollo del proyecto se realiza en base a una planificación que incluye un cronograma que abarca todas las tareas involucradas en el alcance del mismo. Este cronograma maestro integrado (IMS) debe ser establecido, registrado, controlado y mantenido a lo largo de todo el proyecto [20]. Es el documento base en el cual se vuelcan todos los esfuerzos y tareas del proyecto que deben ser realizados tanto por personal de la institución, como por el personal de instituciones socias y de los contratistas, subcontratistas o instituciones comprometidas a través de los correspondientes contratos o acuerdos. Estas tareas deben estar ordenadas temporalmente, vinculadas entre sí y en concordancia con las restricciones del proyecto, para asegurar el cumplimiento de los objetivos.

Existe un único IMS para un proyecto, y todas las tareas, activas o futuras, tienen un cronograma detallado asociado al IMS. Los responsables de los distintos paquetes de trabajo que conforman la WBS son los encargados de generar y mantener los cronogramas detallados de su área, de acuerdo con los parámetros de planificación definidos para el proyecto. Estos cronogramas detallados contienen información sobre: hitos y tareas; duraciones para cada una de las tareas; interdependencias entre tareas e hitos (predecesoras, sucesoras); limitaciones de tareas o hitos (por ejemplo: no comenzar antes de . . . , debe finalizar el , etc) y un calendario (horas laborables, días laborables, vacaciones, etc). Luego, el IMS se genera a través de la integración de todos los cronogramas detallados, permitiendo representar en un solo documento el alcance total del trabajo requerido y

el tiempo asignado para concluirlo.

Una vez que se aprueba el IMS, el mismo se coloca bajo control de configuración y se genera el cronograma base (cronograma al inicio, tal como se planificó) que permitirá ejecutar el proceso de control correspondiente. El cronograma base puede modificarse, pero es aconsejable realizarlo solo a través del proceso de control de cambios establecido por la organización o por el proyecto. El IMS debe reflejar los datos tanto del cronograma base como del estado actual. La comparación del progreso del cronograma actual frente al cronograma base proporciona los datos necesarios para evaluar el desempeño del proyecto en el plano temporal. El cronograma base debe entenderse como un firme compromiso, mientras que el cronograma actual refleja la realidad en el avance y en la predicción futura.

El conocimiento del alcance del trabajo a realizar es el que permitirá arribar a una estimación válida del cronograma. Es necesario identificar y planificar el alcance total en una fase muy temprana, actualizando este alcance y el cronograma asociado a medida que se conozcan las desviaciones que requieren esa actualización. La mayoría de los riesgos asociados al costo y al cronograma de un proyecto pueden mitigarse a través de la planificación temprana. El éxito del proyecto dependerá fuertemente de la precisión y credibilidad del cronograma, las cuales serán tan buenas como lo sean la precisión y credibilidad de la información que alimenta el cronograma, y de la experiencia y camino recorrido por el equipo del proyecto que confecciona ese cronograma.

La identificación de las tareas a realizar, contenidas en la WBS, y la distribución en el tiempo de estas tareas, contenida en el cronograma, permiten estimar los recursos que debieran asignarse para la ejecución de cada tarea. Estos se refieren a mano de obra, adquisición de materiales y equipos, contrataciones, viajes, etc. En relación a esto, la estimación del costo es crítica en la planificación y la gestión de un proyecto. Esta proporciona la información básica del presupuesto total y el flujo temporal de fondos que se requiere. Los análisis y estimaciones tempranas minimizan el riesgo de no arribar a completar el proyecto en los tiempos y dentro de los costos establecidos.

La minimización del riesgo inherente a completar el proyecto (arribar al producto requerido) en tiempo y dentro del presupuesto asignado se basa principalmente en contar con las estimaciones del alcance del trabajo, cronograma del desarrollo, y costo más precisas y creíbles posibles. Para esto es fundamental completar los análisis de compromisos de alto nivel en fases tempranas, identificar los riesgos, su clasificación y desarrollo de los planes de mitigación y emplear

principios claros y buenas prácticas en la Ingeniería de Sistemas. Adicionalmente, es conveniente contemplar reservas o márgenes en los campos de presupuesto, cronograma y desempeño técnico desde el inicio para cubrir riesgos e incertezas. La asignación de márgenes o reservas se debe realizar durante la etapa de formulación del proyecto, basados en la evaluación de los principales riesgos identificados durante esa etapa, y el seguimiento del consumo de dichas reservas es (debe ser) una de las tareas esenciales en la gestión.

El término riesgo hace referencia a un evento no deseado y en general se caracteriza por la combinación de la probabilidad de ocurrencia del evento, y al impacto o consecuencia que ese evento puede causar, si se concreta dicha ocurrencia. El proyecto debe definir una plan de gestión de riesgos que permita abordarlos, a medida que se identifiquen (tomar conciencia del evento) o que ocurran (cuando ocurren y no fue previamente identificado lo llamamos problema), con una metodología establecida.

Los riesgos pueden clasificarse como de implementación, cuando la ocurrencia de un evento impacta en el costo, o en el cronograma, o sobre los aspectos técnicos o programáticos; o riesgo para la misión, cuando impacta en uno o más elementos que hacen a los criterios de éxito de la misión.

3

Teledetección hiperespectral

La teledetección hiperespectral hace referencia al proceso de “adquisición remota de imágenes en cientos de bandas espectrales contiguas de manera que para cada elemento de la imagen es posible derivar un espectro de reflectancia completo” [31]. Luego, para poder transformar los datos obtenidos en información útil y de calidad, es importante comprender cada uno de los elementos de este proceso.

Con este objetivo, en este capítulo se presentan conceptos generales de cada uno. En primer lugar, se analizan las ventajas de la observación remota de la superficie de la Tierra desde aeronaves y satélites, que proporciona información sobre la misma que no es fácilmente adquirida mediante mediciones en la misma superficie. Por otro lado, se describe la obtención de imágenes que contienen información en muchas bandas espectrales contiguas, generadas por cámaras hiperespectrales. Por último, se discute la derivación para cada píxel de la imagen de un espectro de reflectancia completo.

Este último proceso requiere, en particular, entender cómo se relaciona la respuesta del sensor con la energía que llega al instrumento. Este proceso constituye la calibración del instrumento, que se estudiará con más detalle en el *Capítulo 4*. Por otro lado, es necesario entender cómo se relaciona esta energía incidente con la magnitud que se desea conocer, que generalmente es la reflectancia espectral de la superficie que se está observando. Para esto es necesario modelar el proceso de teledetección, a fin de incorporar correcciones a la señal recibida por el instrumento por efectos atmosféricos y geométricos del terreno.

3.1 Antecedentes históricos y aplicaciones

El instrumento *Multispectral Scanner System* (MSS) lanzado en 1972 en la misión Landsat-1 dio comienzo a la era moderna de teledetección con fines científicos de la Tierra desde el espacio [32], aprovechando las características espectrales de los objetos por sobre las espaciales. Este instrumento contaba con cuatro bandas espectrales discretas, cada una de 100 nm de ancho y con un tamaño de píxel de 80 m. Hasta la actualidad están operando versiones mejoradas de este tipo de instrumento, adquiriendo datos utilizados principalmente para la caracterización de coberturas del suelo, la exploración minera y la evaluación de actividades agrícolas. El centro y el ancho de cada una de las bandas espectrales del instrumento se eligen en función de las aplicaciones, a partir de las firmas espectrales conocidas de las coberturas que se quieren detectar.

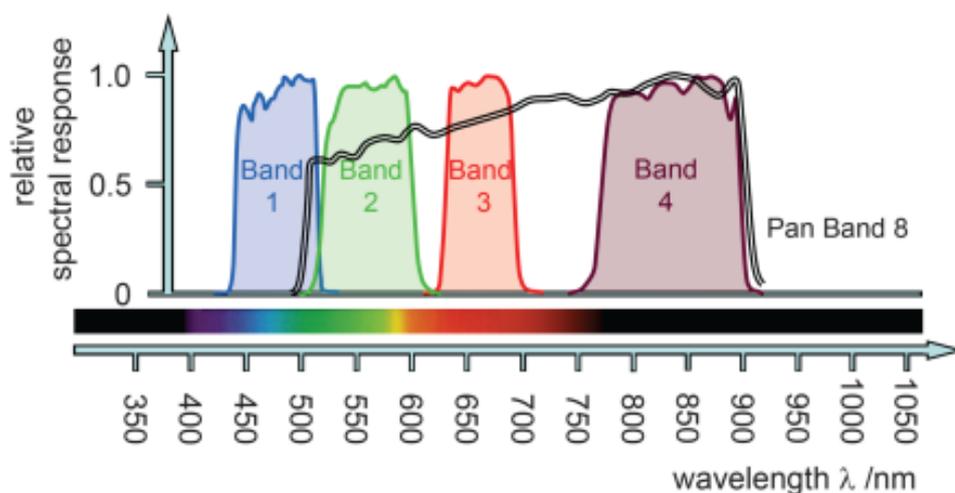


Figura 3.1. Respuesta espectral de bandas 1 a 4 y 8 del visible, del instrumento *Thematic Mapper* del Landsat 5 (imagen adaptada de [33]).

Estas imágenes multispectrales son producidas por sensores que miden la energía reflejada dentro de varias bandas del espectro electromagnético (ver *Figura 3.1*), sobre una amplia gama de longitudes de onda, desde el ultravioleta hasta el visible y hacia el infrarrojo térmico (200 a 15000 nm). Los sensores multispectrales suelen tener entre 3 y 10 bandas diferentes logradas mediante el uso de filtros especialmente seleccionados. La determinación de esta respuesta espectral es parte del proceso de calibración de un instrumento multispectral. La interpretación de una imagen multispectral requiere entonces conocer la respuesta espectral de la combinación detector-filtro utilizada para obtener los datos, de

modo de determinar la presencia y abundancia de distintas coberturas. .

Por otro lado, los instrumentos hiperespectrales, desarrollados gracias a los avances en la tecnología de sensores la adquisición pasiva de imágenes, permiten incluir muchas bandas que cubren el espectro visible, el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR). Estos instrumentos hiperespectrales, por sobre los multispectrales, permiten obtener las firmas espectrales de la superficie observada dado que las bandas son contiguas y con resolución espectral suficiente como para capturar detalles como líneas de absorción de una cierta sustancia.

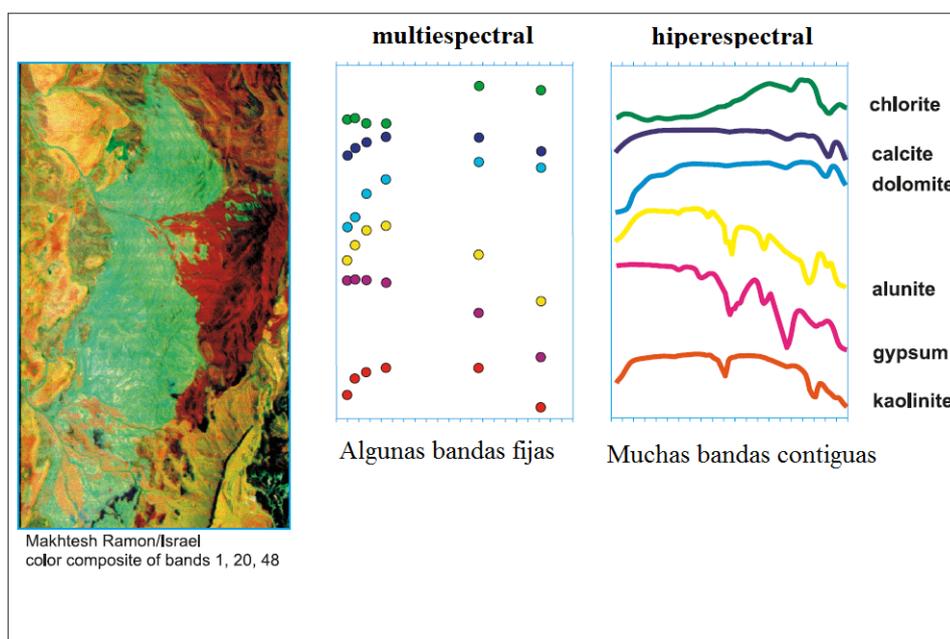


Figura 3.2. Diferencia entre imágenes multispectrales e hiperespectrales (imagen adaptada de [15]).

Desde el desarrollo del concepto de instrumentos hiperespectrales a comienzo de la década de 1980, se han estudiado muchas misiones espaciales, como el *High Resolution Imaging Spectrometer* (HIRIS) de NASA [34], el *Australian Resource Information and Environmental Satellite* (ARIES) [35], las misiones PRISM (*Process Resource by an Imaging Space Mission*) [36] y SPECTRA (*Surface Process and Ecosystem Changes Through Response Analysis*) [37] de ESA y la misión candiense HERO (*Hyperspectral Environment and Resource Observer*) [38], entre otras. Sólo algunos de estos proyectos fueron puestos en órbita con éxito [39].

NASA y ESA lanzaron exitosamente Hyperion [13] [40] en la misión EO-1 y CHRIS [14] en PROBA, en 2000 y 2001 respectivamente [14, 40]. A estas mi-

siones le siguieron la China HJ-1A [41] y la India HySI en IMS-1 [42] en 2008. Un año más tarde, comenzó a operar desde la Estación Espacial Intenacional HICO (*Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean*) [43] de NASA en conjunto con la Oficina de Investigación Naval (*Office of Naval Research*). Con la excepción de HJ-1A e HICO, estos sistemas fueron lanzados como una demostración tecnológica, por lo que tienen capacidades limitadas.

Todos los sensores antes mencionados cubren la porción VNIR (Visible Near/InfraRed) del espectro electromagnético, excepto por Hyperion que además adquiere datos en el rango SWIR (*Short Wave Infra-Red*). La resolución espectral de estos sensores es menor a los 10 nm, excepto CHRIS cuyas bandas varían desde 5,6 nm a 32,9 nm. Este último tiene la capacidad de adquirir imágenes desde cinco ángulos distintos, una característica única que ningún otro instrumento hiperespectral espacial posee, hasta la fecha.

Otras misiones similares a Hyperion desarrolladas en los últimos años son PRISMA (*Italian Hyperspectral Precursor of the Application Mission*) [44], HISUI (*Japanese Hyperspectral Image SUite*) [45] y EnMAP (*Environmental Mapping and Analysis Program*) [46]. Estos poseen una capacidad de adquisición de datos mejorada y proveen datos con una calidad superior a Hyperion y CHRIS. Existen varias iniciativas de cámaras hiperespectrales en desarrollo en la actualidad, en distintos niveles de planificación por parte de distintas agencias espaciales. Entre ellas HypSIRI (*HYperSPectral Infra-Red Imager*) [47], de NASA, que tendrá cobertura global y repetitiva en los rangos VNIR y SWIR.

La observación terrestre mediante el uso de instrumentos hiperespectrales ha alcanzado un nivel de madurez que permite su utilización cada vez más frecuente [15, 48, 49]. Durante los últimos años las misiones satelitales de observación terrestre hiperespectral han demostrado su capacidad para proporcionar información crítica y de calidad en numerosas aplicaciones, tanto civiles como militares. Con el avance de las tecnologías para la adquisición y almacenamiento de datos, computación y telemetría, se ha hecho posible disminuir el costo de desarrollo de estos sistemas [50].

Una cámara hiperespectral en una plataforma satelital generalmente tiene una contraparte aerotransportada, utilizada para el desarrollo de aplicaciones de los datos generados y para desarrollar y validar procedimientos de calibración y procesamiento de datos. Tal es el caso del *European Airborne PRISM Experiment* (APEX) [51] o el *Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer* (AVIRIS) desarrollado por el Jet Propulsion Lab de NASA [7].

Tabla 3.1. Comparación entre características de los instrumentos Hyperion (espacial) y su contraparte AVIRIS (aerotransportado) [5].

Parámetro	AVIRIS	Hyperion
Altitud nominal [km]	20	705
Pisada [km]	11	7.6
Resolución espacial [m]	20	30
Cobertura espectral [nm]	400 a 2500	400 a 2500
Resolución espectral [nm]	10	10
Número de bandas	224	220

Las imágenes hiperespectrales han permitido avances en un gran número de aplicaciones de la observación de la Tierra. En particular, han mostrado ser una herramienta importante en diversas aplicaciones relacionadas con el estudio de agua costera y continental [52–54], el estudio de ecosistemas [55], el estudio de la vegetación y la ecología [56–59], la geología y composición del suelo [60–62], entre muchas otras. Estas aplicaciones pueden ser categorizadas como: detección de anomalías, que divide los píxeles en objetos artificiales o características naturales; reconocimiento de objetivos, que proporciona parámetros de detección junto con parámetros de clasificación de objetivos potenciales y caracterización de fondos, que identifica la condición de las características naturales asociadas con la tierra, el océano o la atmósfera [5].

Mientras que la demanda de este tipo de instrumento ha crecido rápidamente, las métricas y los métodos de validación no han tenido la misma tendencia. Hay una necesidad creciente de establecer especificaciones y estándares para la definición, clasificación y reporte de sensores hiperespectrales [63]. Entre estas especificaciones se incluyen: definición de una terminología estándar de referencia, definición de la caracterización del sensor (incluyendo la calibración), definición de métodos y mejores prácticas, un conjunto de firmas espectrales estándar y un conjunto de algoritmos de procesamiento estándar.

3.2 Adquisición remota de imágenes

El proceso de adquirir información de un objeto sin entrar en contacto con el mismo se conoce como teledetección [64]. Esto se logra detectando y registrando energía reflejada por dicho objeto al ser iluminado por una fuente natural o artificial, o energía emitida por el objeto. Las magnitudes de interés para la aplicación no son usualmente capturadas de manera directa por el instrumento, sino que se derivan o extraen de otras magnitudes involucradas en el proceso de teledetección. Este proceso consta de los siguientes elementos [65]:

1. Fuente de energía o iluminación: el primer requisito para la teledetección es tener una fuente de energía que ilumine o proporcione energía electromagnética al objetivo de interés. La fuente natural más usada en teledetección es el Sol.
2. Interacción entre radiación electromagnética y atmósfera terrestre: al viajar desde la fuente al objetivo, la radiación interactúa con la atmósfera (dispersión, transmisión, reflexión). Esta interacción tiene lugar una segunda vez a medida que la energía viaja desde el objetivo hasta el sensor.
3. Interacción con el objetivo: una vez que la energía alcanza el objetivo, interactúa con este (absorción, reflexión, transmisión). El resultado de esta interacción es función de las propiedades tanto del objetivo como de la radiación, especialmente de su longitud de onda.
4. Registro de la energía por el sensor: después de que la energía ha sido dispersada por, o emitida desde el objetivo, se requiere un sensor remoto para capturar y registrar la radiación electromagnética.
5. Transmisión, recepción y procesamiento: la energía registrada por el sensor tiene que ser transmitida, a menudo en forma electrónica, a un sistema de recepción y procesamiento donde se generan los datos o imágenes.
6. Interpretación y análisis: la imagen procesada se interpreta visual y/o digitalmente o electrónicamente para extraer información sobre el objetivo.
7. Aplicación: el elemento final del proceso de teledetección se logra cuando aplicamos la información del objetivo que hemos podido extraer de la imagen para comprenderlo mejor o ayudar a resolver un problema particular.

En consecuencia, es necesario comprender las variables que contienen la información de interés, de qué manera el sensor registra y preserva esta informa-

ción en los datos que provee y de qué manera es posible extraerla de dichos datos.

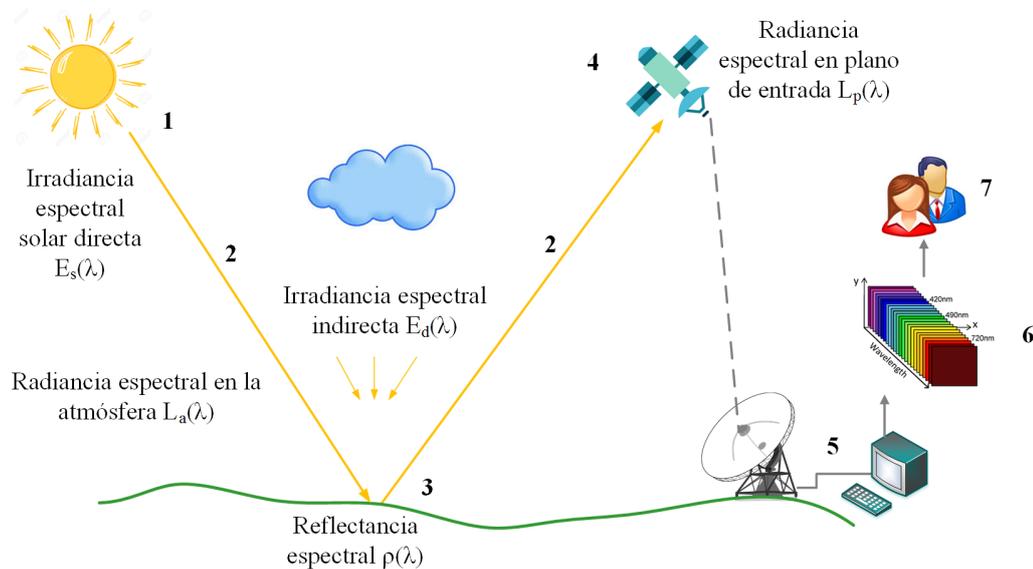


Figura 3.3. Elementos de la teledetección y algunas magnitudes físicas involucradas.

3.2.1 Magnitudes radiométricas

Las propiedades espectrales de los materiales usualmente se describen mediante su reflectancia espectral. Esta magnitud caracteriza la fracción de la luz incidente que es reflejada por el material en función de la longitud de onda y es un número adimensional que toma valores entre 0 y 1. Si se considera que la superficie donde incide la radiación es totalmente difusa (lambertiana), se puede ignorar su dependencia con el ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión y la iluminación. Esta magnitud ha sido utilizada durante muchos años para obtener información de la superficie de la Tierra, basándose en el hecho de que la radiación electromagnética al interactuar con una superficie es absorbida, transmitida o reflejada en proporciones y formas que dependen principalmente de la composición química del material que compone dicha superficie.

Otra magnitud física involucrada en la adquisición de imágenes es la irradiancia. Este término se utiliza para referirse a la potencia de radiación electromagnética que incide sobre una superficie, por unidad de área y sus unidades en *Système Internationale* (SI) son Wm^{-2} . Esta magnitud describe la radiación incidente total. Cuando se desea caracterizar potencia de radiación electromagnética

incidente por longitud de onda, se utiliza la irradiancia espectral, cuyas unidades en SI son $Wm^{-2}nm^{-1}$.

Las magnitudes radiométricas que son directamente captadas por un instrumento óptico son la radiancia $L(\lambda)$ o la radiancia espectral $L_\lambda(\lambda)$. La primera describe la cantidad de radiación que atraviesa o es emitida por un área particular, en una dirección determinada y que cae dentro de un dado ángulo sólido. La radiancia se utiliza para caracterizar la radiación total emitida desde una fuente difusa o reflejada por una superficie difusora en un dado intervalo de longitudes de onda y sus unidades en SI son $Wsr^{-1}m^{-2}$. La radiancia es usualmente utilizada en el caso de instrumentos multiespectrales para indicar cuánto de la potencia emitida o reflejada por una superficie es captada por el instrumento en una determinada banda.

Por otro lado, la radiancia espectral $L_\lambda(\lambda)$ caracteriza la radiación emitida en función de la longitud de onda. Esta magnitud es la que mide un instrumento hiperespectral y sus unidades en SI son $Wsr^{-1}m^{-2}nm^{-1}$. La radiancia resulta entonces de integrar la radiancia espectral en todo el rango de longitudes de onda considerado. En la *Tabla 3.2* se presentan las distintas magnitudes y sus relaciones.

Tabla 3.2. Magnitudes radiométricas involucradas en la adquisición remota de imágenes y sus relaciones.

Magnitud	Símbolo	Relación	Unidades
Irradiancia	E	$E = \frac{\partial P}{\partial A} = \int E_\lambda d\lambda$	Wm^{-2}
Irradiancia espectral	E_λ	$E_\lambda = \frac{\partial P}{\partial A \partial \lambda} = \int L_\lambda d\Omega$	$Wm^{-2}nm^{-1}$
Radiancia	L	$L = \frac{\partial P}{\partial A \partial \Omega} = \int L_\lambda d\lambda$	$Wm^{-2}sr^{-1}$
Radiancia espectral	L_λ	$L = \frac{\partial P}{\partial A \partial \Omega \partial \lambda}$	$Wm^{-2}sr^{-1}nm^{-1}$
Intensidad	I	$L = \frac{\partial P}{\partial \Omega} = \int L dA$	Wsr^{-1}
Potencia	P	$L = \int E dA = \int I d\Omega$	W

3.3 Muchas bandas espectrales contiguas

Para comprender el proceso mediante el cual se generan imágenes que registran información en muchas bandas espectrales contiguas es necesario estudiar la arquitectura y el funcionamiento de una cámara hiperespectral. Estos instrumentos son capaces de capturar con gran fidelidad los atributos espectrales de una escena, lo que permite la reconstrucción de una firma espectral de la escena. Esta firma, expresada generalmente en términos de la reflectancia espectral del material, describe la radiación reflejada como función de la longitud de onda y permite la detección, clasificación, y caracterización de objetos presentes en dicha escena.

Una cámara hiperespectral es un instrumento óptico que utiliza un elemento dispersivo, como un prisma o una red de difracción, para separar espacialmente el espectro de la radiación incidente en el plano de entrada, a fin de que luego incida en un arreglo de detectores, usualmente matricial (ver *Figura 3.4*). La radiación entrante a través de la óptica del instrumento es restringida mediante una rendija (*slit*). Luego el haz atraviesa el elemento dispersivo y se separa espectralmente en dirección perpendicular a la de la rendija de entrada, para luego incidir en el sensor o FPA. Este consiste en un arreglo de detectores, cada uno de los cuales convierte la irradiancia incidente en una señal eléctrica, como corriente o voltaje.

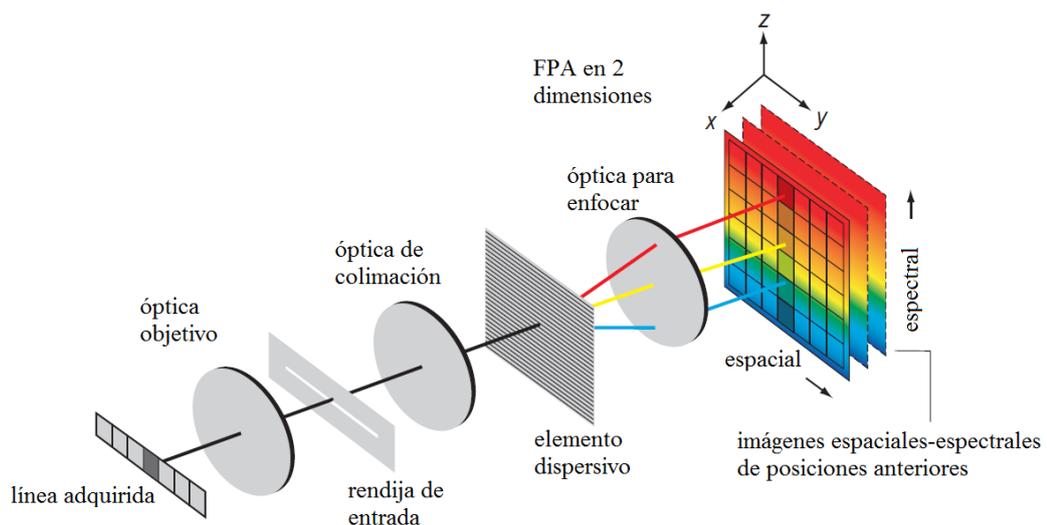


Figura 3.4. Esquema general que muestra los componentes de un sistema dispersivo de captura de imágenes hiperespectrales (adaptado de [5]).

De esta manera, por la geometría del sistema, sobre el sensor quedan determinadas dos dimensiones, una espacial y otra espectral. Cada una de las filas del sensor recibe radiación en intervalos continuos de longitudes de onda. La constitución de bandas espectrales se realiza a partir de la calibración espectral del sensor, proceso que se describe en más detalle en el *Capítulo 4*. Por otro lado, en las columnas del sensor se registran variaciones espaciales de la escena que abarca la rendija de entrada del instrumento.

En general, un sistema de captura de imágenes hiperespectrales cuenta además con una electrónica de lectura, un sistema de procesamiento de datos y un sistema de apuntamiento y estabilización, como se esquematiza en la *Figura 3.5*.

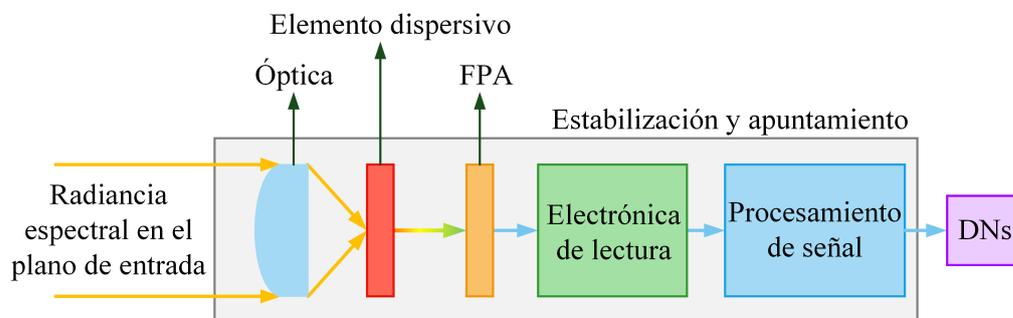


Figura 3.5. Esquema básico en el que se observan los elementos que componen un sistema de captura de imágenes hiperespectrales (adaptado de [1]).

La electrónica de lectura multiplexa la señal analógica proveniente de los detectores y se ocupa de amplificarla, filtrarla y digitalizarla a fin de conformar una imagen digital que pueda luego ser procesada. Los datos crudos generados por el instrumento se presentan en forma de una imagen en la cual cada píxel tiene asociado un número (DN, *Digital Number*), que representa la respuesta del píxel a la irradiancia incidente.

Al estar montados sobre una plataforma satelital (o incluso aérea) que se encuentra en movimiento, se requiere incorporar un sistema de apuntamiento y estabilización para poder obtener imágenes de calidad. Este sistema cumple por un lado la función de orientar el instrumento de manera de capturar la escena deseada, y por otro compensar por perturbaciones introducidas por la plataforma, como vibraciones y cambios de actitud, a fin de obtener una imagen de la escena que cumpla con los requerimientos de calidad impuestos al instrumento. A medida que la plataforma avanza, la línea de visión del instrumento debe ser estabilizada durante el tiempo de integración, para evitar una imagen borrosa.

En el presente trabajo se considerarán sistemas de teledetección hiperespectral pasivos, que proveen información sobre áreas extensas de la superficie de la Tierra, que se encuentran montados en plataformas satelitales y, en consecuencia, adquieren información sobre objetos que se encuentran a varios kilómetros de distancia. El término pasivo se refiere al hecho de que el instrumento depende completamente de fuentes naturales de radiación electromagnética, generalmente la radiación solar.

El método de exploración generalmente utilizado con cámaras hiperespectrales móviles es el denominado *pushbroom*. En este, la dimensión espacial del sensor es orientada de manera perpendicular a la dirección *cross-track*, y transportada en la dirección de vuelo a un ángulo fijo. En este modo, las dimensiones del FPA determinan la pisada o ancho de la imagen en la dirección *cross-track*.

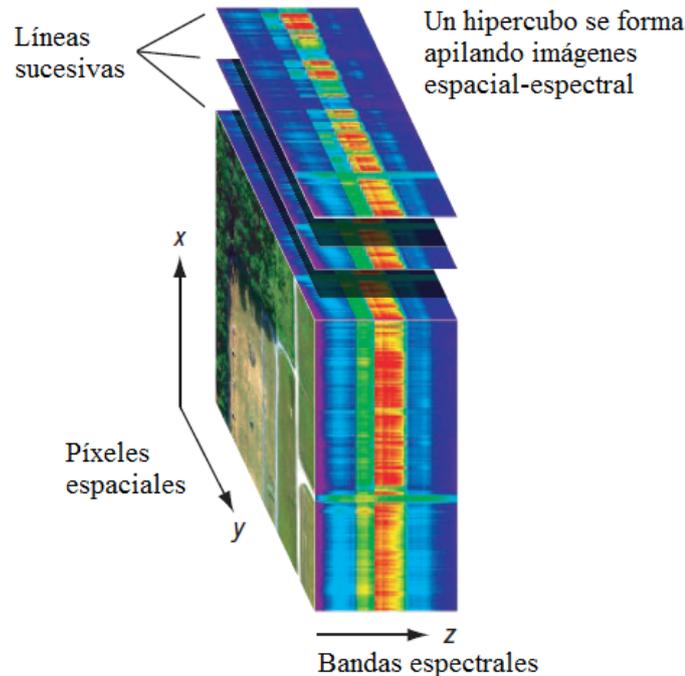


Figura 3.6. Hipercono. Estructura de una imagen hiperespectral conformada por sucesivas adquisiciones del instrumento. Para cada píxel de la línea adquirida se conforma un espectro del que pueden identificarse los materiales presentes en la escena (imagen adaptada de [5]).

El resultado de estas capturas se denomina frecuentemente hipercono (ver *Figura 3.6*) y se conforma mediante un barrido de la escena a medida que la plataforma avanza, adquiriendo una secuencia continua de cuadros espacial-espectral. Este hipercono consiste en una estructura en 3 dimensiones conformada por capas de imágenes en escala de grises de manera que cada píxel de estas imágenes

tiene asignado un DN que luego de una adecuada calibración radiométrica puede asociarse a un valor de radiancia espectral. En consecuencia, cada píxel de estas imágenes contiene un espectro de radiancia espectral que luego de un proceso de correcciones puede derivarse en un espectro de reflectancia espectral. Este proceso será descrito en la *Sección 3.4*.

El desempeño de un sistema de captura de imágenes EO/IR depende de su capacidad de generar una imagen de la escena sin distorsiones ni aberraciones, así como la capacidad del FPA para convertir una imagen en irradiancia a una forma analógica o digital con bajo nivel de ruido y muestreo espacial fino. Estas capacidades se determinan durante el proceso de caracterización del instrumento mediante un conjunto de pruebas para comprender el desempeño del sensor (ver *Capítulo 4*).

3.3.1 Muestreo y resoluciones

La calidad de una imagen capturada por una cámara hiperespectral está condicionada principalmente por el ancho de la respuesta espectral del sensor, la granularidad con la cual el FPA puede muestrear la imagen en irradiancia, la relación señal/ruido y la presencia de artefactos debidos a *straylight*, imperfecciones ópticas y focales e interferencia electrónica. De estos factores, el último es el más difícil de caracterizar y tiende a ser específico del sistema. Sin embargo, existe un conjunto de métodos para relacionar la calidad de la imagen con los tres primeros atributos y los parámetros del sistema que la afectan: resolución espectral, resolución espacial y resolución radiométrica.

La resolución radiométrica es una medida del contraste de la imagen relativo al nivel de ruido. Es posible evaluar esta sensibilidad a partir de parámetros ópticos del sistema y del FPA, asociados al cociente señal ruido (SNR) de la imagen digital generada.

La resolución espacial es una medida de la distancia mínima en que se pueden resolver dos objetos puntuales iguales y suele equipararse a la distancia de muestreo (GSD), aunque en general esta última puede ser menor que la resolución espacial. Para los sistemas considerados en este trabajo, esta distancia varía entre una fracción de metros y decenas de metros, dependiendo principalmente de la apertura del instrumento y la altitud de la plataforma, la cual a su vez depende del tipo de plataforma, satelital o aérea.

La resolución espectral es una medida de la capacidad del instrumento

de distinguir entre diferencias sutiles en longitud de onda y se relaciona con el número y ancho de las bandas espectrales que posee el instrumento. Estas bandas pueden variar en resolución (ancho), pueden superponerse o ser contiguas dependiendo del diseño del sensor.

3.4 Derivación de un espectro de reflectancia completo

Hasta ahora hemos descrito el proceso mediante el cual una cámara hiperespectral es capaz de generar una imagen de una escena remota en muchas bandas espectrales contiguas. Dada la calibración del instrumento, tanto espectral como radiométrica, la imagen cruda en DN entregada por la cámara puede convertirse en radiancia espectral $L_p(\lambda)$ en el plano de entrada del instrumento.

Por otro lado, como mencionáramos anteriormente, la reflectancia espectral de una superficie es indicadora de los materiales presentes en ella, los cuales reflejan, dispersan, absorben y emiten radiación electromagnética de acuerdo a las características de su composición molecular y de sus características macroscópicas, como forma y tamaño. Luego, para poder utilizar la imagen calibrada generada por el instrumento para la detección e identificación de distintas coberturas de la escena a partir de sus características espectrales es necesario establecer un vínculo entre radiancia espectral medida por la cámara y reflectancia espectral de la superficie. Este vínculo requiere la utilización de modelos de transferencia radiativa, como se explica brevemente a continuación.

Los modelos de transferencia radiativa permiten describir la propagación de radiación electromagnética proveniente de diversas fuentes hasta el sensor, incluyendo la interacción con objetos y su entorno, así como la atmósfera. La transferencia radiativa es otro factor crítico que debe ser comprendido pues provee las relaciones físicas entre la magnitud medida en el plano de entrada del sensor, generalmente radiancia espectral, con la propiedad espectral aparente del material, generalmente la reflectancia espectral.

Existen diversos métodos y modelos para cuantificar y compensar los efectos de la atmósfera. Entre estos se distinguen dos clases: métodos estadísticos basados en información de la escena [66,67] o métodos basados en modelos físicos [1]. Los primeros hacen uso de información sobre las características de la reflectancia de objetos de referencia en una escena (como paneles de calibración) para desarrollar relaciones estadísticas entre las observaciones en el sensor con la reflectancia de la superficie. Los métodos basados en modelos físicos apuntan a la construcción

de un modelo que incorpore las características de la iluminación, la composición de la escena y la propagación de la radiación en la atmósfera para determinar la radiación que alcanza la entrada del instrumento. Estos modelos implican una combinación lineal de los elementos mencionados.

Entonces, si se puede estimar la corrección por efectos de la atmósfera y combinar esto con las características espectrales de los materiales en la escena, es posible formar un modelo de observación para la radiancia espectral medida en el plano de entrada del instrumento hiperspectral. Por ejemplo, de acuerdo al proceso descrito en la *Figura 3.3*, se puede establecer mediante un balance energético, que la radiancia espectral que llega al plano de entrada del instrumento $L_p(\lambda)$ puede ser modelada como [1]:

$$L_p(\lambda) = L_a(\lambda) + \frac{\tau_a(\lambda)\rho(\lambda)}{\pi} [E_s(\lambda) + E_d(\lambda)] \quad (3.1)$$

donde $L_a(\lambda)$ es la radiancia espectral que atraviesa la atmósfera, $E_s(\lambda)$ es la irradiancia solar directa, $E_d(\lambda)$ es la irradiancia indirecta, $\tau_a(\lambda)$ es la transmitancia atmosférica y $\rho(\lambda)$ es la reflectancia espectral de la superficie observada. Esta última es la magnitud física que se desea conocer. La ecuación (3.1) permite despejar esta magnitud conociendo todas las demás.

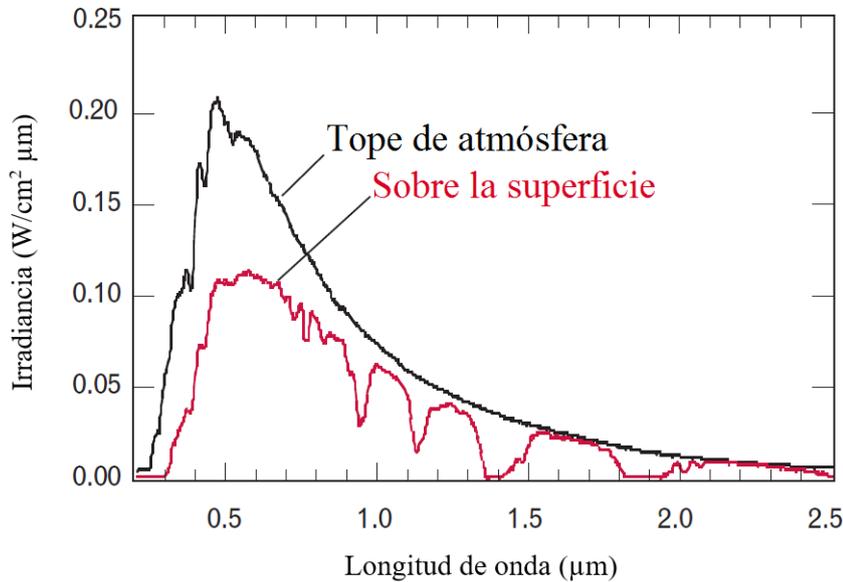


Figura 3.7. Irradiancia solar en el tope de la atmósfera (*TOA*) e irradiancia solar al nivel del suelo (imagen adaptada de [5]).

En el caso de la iluminación solar, la irradiancia espectral que llega a la atmósfera terrestre se encuentra bien caracterizada (ver *Figura 3.7*). En cambio, el espectro de radiación solar que alcanza la superficie terrestre se ve alterado por la atmósfera. Esta modulación debe ser tenida en cuenta y requiere la aplicación de modelos físicos que consideren las interacciones entre la radiación solar y los átomos, moléculas y otras partículas que componen la atmósfera.

Una vez recuperada la reflectancia espectral, esta debe ser procesada para extraer componentes que puedan compararse con firmas espectrales conocidas, a fin de identificar los materiales presentes en la escena. Esta etapa del proceso de teledetección involucra el procesamiento de imágenes hiperespectrales. Esta información no es fácilmente visualizable, por lo que se requiere de procesamiento computacional para su extracción. En consecuencia, se destina una atención significativa al desarrollo de técnicas algorítmicas para detectar, clasificar, identificar, cuantificar y caracterizar objetos y propiedades de interés en los datos. En este sentido, y a grandes rasgos, se adoptan dos enfoques generales de procesamiento: modelado físico y procesamiento estadístico de señales.

Cuando se aplica la teledetección hiperespectral para la clasificación de coberturas del suelo, es usualmente conveniente utilizar métodos estadísticos de procesamiento o alguna combinación de modelos físicos y procesamiento estadístico de señales, ya que estos métodos son más capaces de incorporar la aleatoriedad de las características espectrales que generalmente existe en imágenes reales y es difícil de modelar físicamente. Muchos de los métodos aplicados evolucionaron del procesamiento estadístico de señales en comunicaciones y son específicos para la aplicación de interés, aunque presentan elementos en común, a saber, la compensación de influencias de la atmósfera y el ambiente en general; métodos matemáticos para ajustar los datos al modelo pertinente y un enfoque para detectar, identificar y clasificar materiales a partir de su firma espectral. Este último se basa generalmente en pruebas de hipótesis, utilizando datos estadísticos apropiados y modelos para los datos espectrales.

En la *Figura 3.8* se muestra resumido el proceso de obtener información útil para la aplicación a partir de los datos crudos que entrega el instrumento. Este diagrama resume el proceso descrito en este capítulo. El paso de datos crudos a datos calibrados requiere la calibración del instrumento. El proceso de calibrar una cámara hiperespectral se estudiará en el siguiente capítulo.

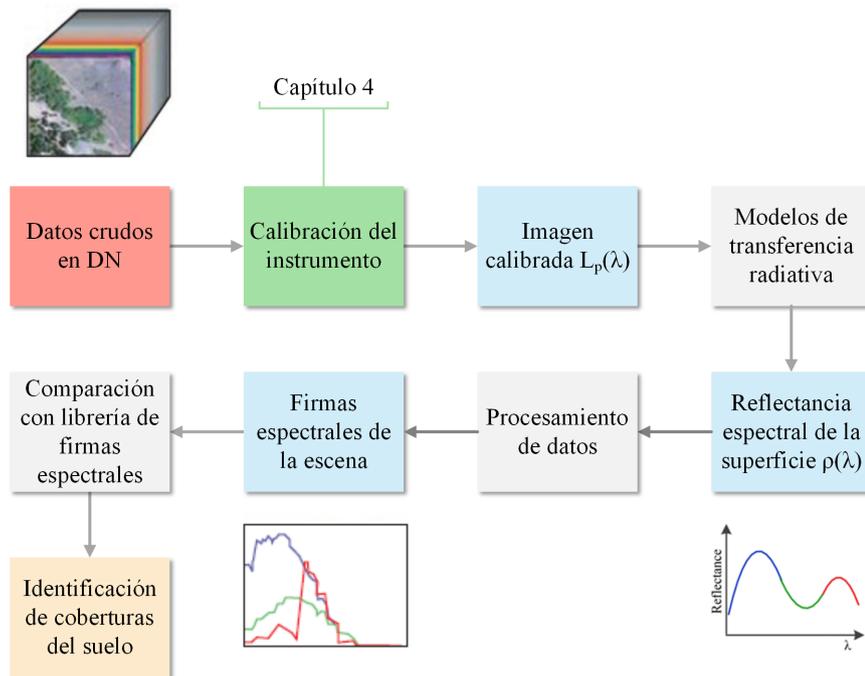


Figura 3.8. Etapas en el proceso de obtener información espectral sobre la escena a partir de los datos crudos generados por una cámara hiperespectral.

4

Calibración de cámaras hiperespectrales

En este capítulo se presenta en primer lugar una discusión sobre el concepto de calibración, enfatizando su objetivo y la importancia de calibrar un instrumento para así transformar los datos crudos que genera en unidades físicas.

Luego, se presenta un conjunto de parámetros que permiten describir funcionalmente el instrumento en términos de linealidad, uniformidad y ruido, tanto en el sensor como a nivel sistema, además de distorsiones que puede sufrir la imagen conformada sobre el FPA por defectos en la alineación y foco del instrumento. Esta caracterización tiene como principal resultado la identificación de un modelo matemático que describe el desempeño del sensor, sobre el cual se construye el modelo radiométrico.

Por último, se describen las fuentes y métodos que se utilizan para la calibración tanto espectral como radiométrica de cámaras hiperespectrales. Estos se extraen de un relevamiento de diversos procesos de calibración y de un conjunto de lineamientos y buenas prácticas que se aplican a la calibración de instrumentos EO/IR.

4.1 Calibrar como proceso

Los datos crudos que produce una cámara hiperespectral, generalmente en forma de cuentas digitales o DN, no encierran en sí mismos información sobre la escena capturada por el instrumento. La posibilidad de obtener información cuantitativa de los materiales presentes en dicha escena a partir de estos datos depende de la determinación de la respuesta espectral y radiométrica del instru-

mento. En términos generales, las experiencias que se realizan para determinar estas respuestas constituyen la calibración del instrumento.

Se entiende que una calibración es un proceso mediante el cual se identifican y cuantifican aquellos parámetros necesarios para describir y comprender el desempeño del instrumento e interpretar los datos que genera. A través de este proceso se determina la respuesta del instrumento, se evalúan errores sistemáticos que podrían existir y se establece la trazabilidad a normas nacionales e internacionales mediante el cálculo de las incertezas asociadas [17]. La calibración provee evidencia objetiva de que el instrumento cumple con los requerimientos de desempeño.

En última instancia, calibrar implica asignar unidades de ingeniería y una incerteza a los datos generados por el instrumento, a fin de que estos se ajusten a un estándar reconocido [16]. Esta asignación requiere contar con un modelo que relacione las variables primarias (medidas, DN) con la magnitud deseada (radiancia espectral). El proceso de calibración implica entonces una comparación de la respuesta del instrumento con un valor físico conocido, como por ejemplo, un instrumento muy preciso calibrado (instrumento patrón) [68], teniendo ambos el mismo estímulo del ambiente.

Una vez establecida una relación entre la radiancia espectral en el plano de entrada del instrumento y la imagen en DN generada por el mismo, por medio de comparaciones de la respuesta del instrumento con un estándar o patrón, el instrumento puede ser considerado como instrumento de medición de dicha magnitud física. Este es el objetivo primario de una calibración radiométrica. Otro objetivo importante es poder asociar a las mediciones realizadas con el instrumento una incerteza.

Entonces un instrumento se considera calibrado cuando es posible demostrar, mediante una cadena ininterrumpida de mediciones bien documentadas, que la respuesta del instrumento ha sido en efecto comparada con un estándar reconocido, el cual puede ser nacional, internacional o un estándar basado en constantes físicas fundamentales [16]. Esta cadena de mediciones debe además contar con sus incertezas debidamente identificadas y documentadas. El concepto antes descrito se conoce como trazabilidad. Esta adhesión comprobada a un estándar reconocido es fundamental para poder considerar al proceso una calibración.

En el caso de cámaras hiperspectrales es necesario realizar su calibración espectral, sin la cual no es posible la reconstrucción de curvas de radiancia espectral a partir de los datos crudos. Esta calibración, que busca determinar la

respuesta espectral del instrumento, debe realizarse antes de la calibración radiométrica. Como en el caso de la calibración radiométrica, esta calibración implica comparar la respuesta del instrumento ante una señal de espectro conocido, a fin de poder asignar un valor de longitud de onda a cada píxel del sensor.

La calibración de un instrumento, tanto espectral como radiométrica, se realiza dentro de un rango de valores y en condiciones ambientales específicas. Estos parámetros de calibración definen la validez de la misma y deben ser establecidos en función de las características del instrumento, de las condiciones de operación y la aplicación en la cual se lo utilizará. Además de estos rangos de validez, existe uno temporal, en el cual el instrumento puede considerarse calibrado. Luego, por el propio uso y degradación, este debe ser calibrado periódicamente.

Al seleccionar la fuente con la que se realizará la calibración es importante establecer si el objetivo de la calibración para la aplicación de interés es reducir el efecto del ruido en la imagen, o bien se busca obtener una imagen que mantiene la trazabilidad radiométrica absoluta a la radiancia espectral en el plano de entrada del instrumento. La primera se conoce como calibración relativa y requiere fuentes que sean espacialmente uniformes pero no necesariamente calibradas, mientras que la segunda se llama calibración absoluta y requiere fuentes cuya iluminación está precisamente determinada en términos radiométricos y es posible establecer su trazabilidad a una referencia absoluta [1].

4.1.1 Estándar de calibración

La calibración de un instrumento requiere la utilización de un estándar o patrón reconocido. Un estándar es un objeto, artefacto, material, instrumento, experimento o sistema que almacena o proporciona una cantidad física y que sirve de base para las mediciones de dicha cantidad. Un estándar se utiliza además como referencia para el establecimiento de una unidad para la medición de la cantidad física [17].

Existen distintos tipos de estándares. Un estándar primario es el que tiene las cualidades metrológicas más altas. Puede ser establecido a partir de primeros principios, cálculos o construido sin necesidad de realizar mediciones. Un estándar de este tipo, también conocido como estándar intrínseco, puede basarse en una magnitud física, como el triple punto del agua, o en un artefacto acordado internacionalmente, como el kilogramo, almacenado en el *International Bureau of Weights and Measures* (BIPM) en París.

Un estándar secundario está diseñado para transportar una escala de calibración. Debe ser tan estable y repetible como sea posible y se encuentra calibrado en referencia a un estándar primario.

Por último, se pueden definir estándares de trabajo, similares a los estándares secundarios pero apartados una generación más del estándar primario. Estos son los estándares que generalmente se utilizan en procesos rutinarios de calibración. Cabe remarcar que a medida que nos alejamos del estándar primario crecen las incertezas debido a los errores que ocurren inevitablemente en las transferencias.

Otros términos utilizados para describir un estándar son nacional o internacional, de acuerdo al nivel de consenso que tiene el estándar. Un estándar de consenso se refiere a un estándar adoptado ante la falta de otro apropiado.

4.1.2 Mediciones y estimación de incertezas

Una medición está incompleta a menos que esté acompañada de una estimación de la incerteza asociada a dicha medición [16]. Las incertezas que surgen durante un proceso de calibración pueden provenir de diferentes fuentes, por ejemplo, del ruido del instrumento, la no linealidad del sensor, la no uniformidad de la respuesta espectral o radiométrica de los píxeles del sensor y de la incerteza propia de la fuente de referencia utilizada para la calibración [69].

Al estimar incertezas es necesario considerar todas las fuentes posibles de error. Este término hace referencia a la desviación del valor medido con respecto al valor real de una determinada magnitud. Los errores pueden clasificarse en dos tipos, sistemáticos (B) o aleatorios (A), de acuerdo a su naturaleza. En la *Figura 4.1* se esquematizan ambos tipos de error, poniendo en evidencia sus diferencias.

Los errores sistemáticos son repetibles y consistentes, con un sesgo constante. Es posible detectarlos y pueden ser corregidos o en todo caso pueden ser tenidos en cuenta. El término exactitud se relaciona frecuentemente con este tipo de error, implicando la ocurrencia de pequeños errores sistemáticos. Una medición que presenta un error sistemático pequeño posee una alta exactitud.

Por otro lado, los errores aleatorios varían de manera impredecible entre una medición y otra de una magnitud, cuando estas se realizan en condiciones idénticas. Este tipo de errores se asocia usualmente con el término precisión. Una medición es más precisa cuanto más repetible sea. Los errores aleatorios pueden ser mejorados de diferentes maneras, reduciendo el ruido inherente del proceso

de medición o mejorando la escala de nuestro instrumento. Pero la manera más efectiva es tomar un número grande de mediciones y realizar un análisis estadístico de esta muestra, calculando un valor medio y desviación estándar, a fin de reducir el ruido y mejorar la confianza en el resultado obtenido.

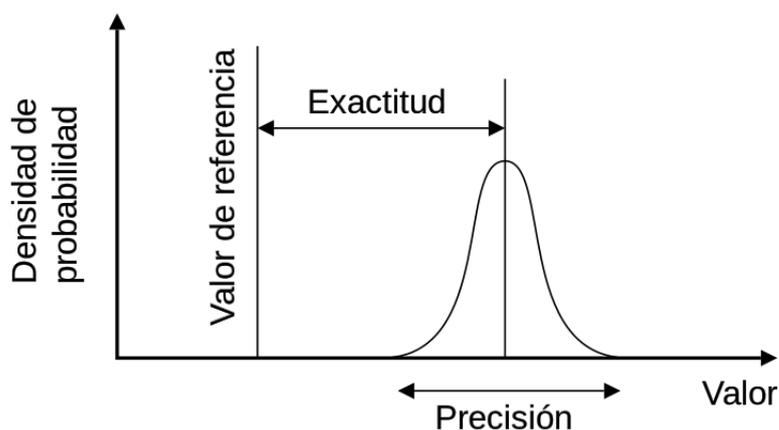


Figura 4.1. Esquema que muestra la relación entre exactitud, precisión y el valor “real” o de referencia de la magnitud medida (imagen extraída de Wikimedia Commons).

Los errores pueden ser además clasificados como aditivos o multiplicativos. Los primeros dan por resultado una incerteza independiente de la medición, mientras que los segundos son proporcionales a la lectura del instrumento.

Frecuentemente se considera que los términos precisión e incerteza son sinónimos y se los utiliza de manera indistinta. Sin embargo, la incerteza total de la medición se obtiene de considerar ambos tipos de error, tanto sistemáticos como aleatorios. Esto se realiza a partir de la ecuación que describe la relación entre la magnitud a medir y las distintas fuentes de error, mediante propagación de errores [16, 17, 70].

El error en una medición puede ser expresado en términos absolutos, en las mismas unidades de la magnitud medida, o bien en términos relativos, usualmente expresado en porcentaje. En definitiva, la incerteza de una medición establece un rango de valores posibles para la magnitud medida, junto con una valoración de la confianza que se tiene en el rango establecido.

4.2 Fuentes de referencia para la calibración

En esta sección se describen las características principales de las fuentes que usualmente se utilizan para la calibración de una cámara hiperespectral, como referencia contra la que se realiza la comparación de la respuesta del instrumento.

4.2.1 Referencias para la calibración espectral

Para la calibración espectral es posible utilizar diversas fuentes. Una de ellas es el monocromador. En la *Figura 4.2* se muestra un esquema del funcionamiento de un monocromador con diseño Czerny-Turner [71]. Esta fuente permite la selección de una longitud de onda específica de una fuente de iluminación con un rango espectral amplio, generalmente una lámpara halógena. Esta fuente es básicamente un espectrómetro que tiene una rendija de salida en lugar de un FPA. La red de difracción está montada sobre un disco rotativo de precisión que permite sintonizar la longitud de onda deseada. Para poder utilizar un monocromador como estándar para una calibración espectral absoluta, este debe estar debidamente calibrado.

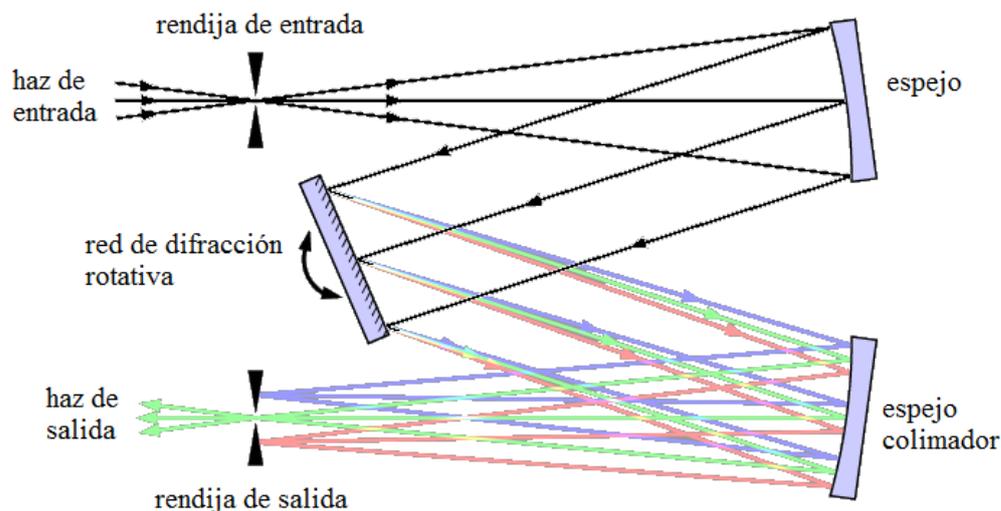


Figura 4.2. Esquema de un monocromador de Czerny-Turner (imagen adaptada de [71]).

Otro tipo de fuente que puede ser utilizada para la calibración espectral es la lámpara de descarga, que emite radiación en longitudes de onda característi-

cas, asociadas a la estructura atómica y molecular del gas que contiene. Estas fuentes de referencia no requieren contar con un certificado de calibración porque constituyen estándares intrínsecos.

4.2.2 Referencias para la calibración radiométrica

La calibración radiométrica requiere fuentes de referencia cuya radiancia espectral sea bien conocida y pueda ser controlada. Una calibración absoluta requiere una referencia que pueda demostrar trazabilidad a un estándar.

En la porción VNIR/SWIR del espectro electromagnético se pueden utilizar fuentes de cuarzo-tungsteno (QTH), cuya radiancia espectral se encuentra calibrada. El problema con este tipo de fuentes de referencia es que presentan un patrón de iluminación que no es uniforme espacialmente. A fin de obtener una iluminación difusa, se puede utilizar una superficie reflectiva rugosa, como por ejemplo un panel de Spectralon (LabSphere, Inc.) que tiene una alta reflectancia y es una buena aproximación a un difusor Lambertiano. La configuración descrita se muestra en la Figura 4.3. En este caso, se puede demostrar que la radiancia espectral en el punto de medición es [1]:

$$L_\lambda = \frac{\rho_s(\lambda)E_s(\lambda)}{\sqrt{2\pi}} \quad (4.1)$$

donde $E_s(\lambda)$ es la irradiancia espectral calibrada de la fuente a una distancia d y $\rho_s(\lambda)$ es la reflectancia del panel.

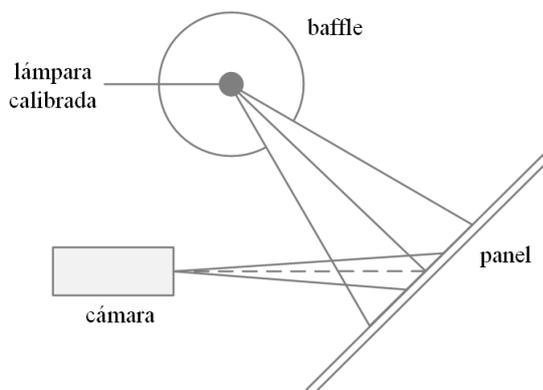


Figura 4.3. Configuración utilizada para la calibración radiométrica usando una lámpara como fuente de referencia. El panel difusor cumple la función de generar una señal uniforme y Lambertiana (imagen adaptada de [1]).

La radiancia espectral calculada con la ecuación (4.1) sólo se sostiene sobre una región relativamente pequeña del panel. Lejos de este punto central, la irradiancia cae según el cuadrado de la distancia fuente-panel. Por lo tanto, esta disposición no produce el efecto de radiancia espectral uniforme deseada. Esta disposición puede ser eficaz para la calibración relativa si el FOV del sensor es estrecho. Sin embargo, esta configuración es menos efectiva para la calibración absoluta porque la radiación espacialmente integrada sobre la pupila de entrada no es directamente medible y está también limitada por la estabilidad temporal de la lámpara entre mediciones.

La referencia que más frecuentemente se utiliza para la calibración radiométrica es la esfera integradora. Esta fuente es capaz de producir una iluminación espacialmente uniforme y Lambertiana. La fuente consiste en una esfera cuyo interior se encuentra recubierto con un material reflectivo difusor y que tiene un agujero o puerto de salida. Dentro de esta esfera se encuentran fuentes de iluminación como lámparas halógenas y cuentan generalmente con *baffles* para asegurar que la radiación de salida es el resultado de múltiples reflexiones de la radiación de la fuente en las paredes de la esfera. De esta manera se logra una iluminación uniforme y difusa, lo cual la acerca a una fuente ideal de calibración.

Para poder utilizarlas en la calibración radiométrica de un instrumento óptico, estas fuentes son calibradas por medio de un método llamado de transferencia de un estándar. Este método implica la utilización de un instrumento como un espectroradiómetro, el cual mide la señal de una fuente calibrada o estándar, utilizando una geometría similar a la que muestra la *Figura 4.3*. Este mismo espectroradiómetro se utiliza para medir la salida de la esfera integradora. Si la respuesta del espectroradiómetro es lineal y estable, se pueden comparar las mediciones realizadas ante ambas fuentes, el estándar y la esfera integradora, de manera que la radiancia espectral de la esfera integradora se puede calcular como [1]:

$$L(\lambda) = \frac{N_s(\lambda)}{N_r(\lambda)} L_r(\lambda) \quad (4.2)$$

donde $N_s(\lambda)$ es la medición realizada frente a la esfera integradora, $N_r(\lambda)$ es la medición obtenida frente al estándar y $L_r(\lambda)$ es la radiancia espectral de referencia computada mediante la ecuación (4.1).

En las regiones espectrales MWIR y LWIR, se utilizan típicamente fuentes de calibración de cuerpo negro para la calibración radiométrica.

4.3 Caracterización de cámaras hiperspectrales

Un planteo adecuado de la calibración radiométrica de una cámara hiperspectral requiere contar con un modelo radiométrico del instrumento. Este modelo permite describir y predecir el comportamiento y funcionamiento del instrumento en su totalidad. En particular, incluye un modelo que permite relacionar la radiancia espectral en el plano de entrada de la lente con la imagen en DN generada. Este modelo debe ser propuesto a partir de un conocimiento detallado del funcionamiento del instrumento particular, que a su vez parte de la determinación de un modelo físico matemático que describa el comportamiento del sensor.

Por otro lado, es necesario identificar y cuantificar parámetros que abarcan aspectos como linealidad, sensibilidad, ruido, uniformidad y píxeles anómalos a fin de poder realizar una interpretación correcta de la señal generada por el instrumento.

Esta tarea de determinación de parámetros funcionales y de desempeño del instrumento se denomina caracterización. En el caso de cámaras hiperspectrales, no existen estándares que guíen la caracterización. Sin embargo, existen lo que se denominan buenas prácticas, que consisten en la identificación de un conjunto de parámetros de desempeño y métodos para su determinación, compilados a partir de numerosas y diversas experiencias de caracterización de este tipo de instrumentos. En esta sección se describen estas buenas prácticas, orientadas a la caracterización de cámaras que adquieren en el espectro visible e infrarrojo cercano (VNIR) basados en la difracción del haz de luz incidente en su lente.

4.3.1 Caracterización del sensor

La caracterización del instrumento comienza entonces por adoptar un modelo físico matemático que describa el comportamiento de su sensor, que permita describir su funcionamiento e identificar parámetros de desempeño a determinar. En la *Figura 4.4* se muestra una propuesta para este modelo [72, 73]. Este modelo entiende que los fotones que inciden sobre un píxel del sensor durante un determinado tiempo de exposición generan, al interactuar con el material que compone el sensor, un conjunto de fotoelectrones. Estos fotoelectrones constituyen una carga que es transformada en voltaje y luego amplificada y digitalizada, de manera que la señal de salida del píxel es un número o cuenta digital (DN).

Este modelo se basa en un conjunto de suposiciones sobre el sensor o FPA, a saber:

- la cantidad de fotones que inciden sobre un píxel depende del producto de la irradiancia E (Wm^{-2}) en la superficie del sensor y del tiempo de exposición o integración t_{int} (s);
- el sensor es lineal, es decir, la señal que produce aumenta proporcionalmente al número de fotones incidentes;
- el ruido presente en el sensor es estacionario y blanco con respecto al tiempo y espacio. Los parámetros que describen al ruido son constantes respecto del tiempo y el espacio;
- sólo la eficiencia cuántica total depende de la longitud de onda. Los efectos causados por radiación de diferentes longitudes de onda se superponen linealmente;
- sólo la corriente oscura depende de la temperatura.

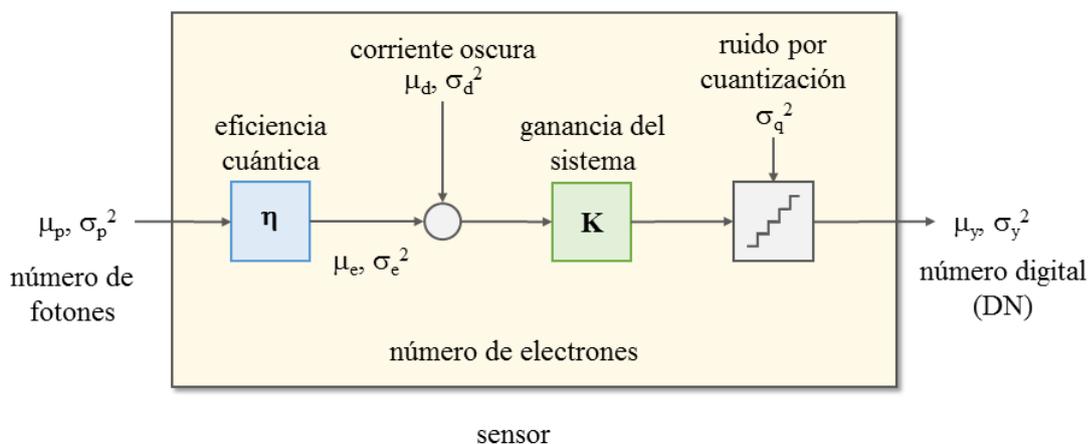


Figura 4.4. Modelo del sensor de una cámara hiperespectral. Las variables indicadas con μ representan valores medios y σ su desviación estándar (imagen adaptada de [73]).

Este modelo tiene en cuenta además posibles fuentes de error que afectan la salida del sensor, entre ellas la corriente oscura, compuesta por electrones generados por la agitación térmica del material que compone el FPA, y el ruido por cuantización inherente al proceso de conversión analógica-digital.

A partir de este modelo, y en la relación entre las distintas variables que considera, es posible realizar una descripción del desempeño del sensor. Como criterios generales, es conveniente barrer todo el rango de radiancias espectrales

y tiempos de integración disponibles para el instrumento particular, a fin de realizar una caracterización completa.

De acuerdo al modelo propuesto, la señal media μ_y asociada a cada píxel del sensor puede escribirse como:

$$\mu_y = K(\mu_e + \mu_d) = \mu_{y,dark} + K\mu_e \quad (4.3)$$

donde μ_d es el número medio de electrones que se generan en ausencia de luz, que resulta en la señal oscura media $\mu_{y,dark} = K\mu_d$, en unidades de DN. Esta señal oscura depende principalmente del tiempo de integración y de la temperatura en la que opera el sensor. Luego, teniendo en cuenta que $\mu_e = \eta_q\mu_p$, donde η_q es la eficiencia cuántica del sensor y que el número medio de fotones que inciden en un píxel de área A se puede calcular como:

$$\mu_p = \frac{AE\lambda t_{int}}{hc} \quad (4.4)$$

donde h es la constante de Planck y c es a velocidad de la luz en el vacío, se obtiene que el valor medio en DN de la respuesta del píxel es:

$$\mu_y = \mu_{y,dark} + K\eta_q\mu_p = \mu_{y,dark} + K\eta_q \frac{A\lambda}{hc} Et_{int} \quad (4.5)$$

Esta ecuación, que establece una relación lineal entre la señal media producida por el píxel y el producto entre irradiancia en la superficie del sensor y el tiempo de integración, resulta apropiada para analizar la linealidad del comportamiento del sensor.

Para esto es necesario capturar imágenes con el sensor ubicado frente a una fuente de radiancia espectral uniforme conocida. Se adquieren imágenes para varios valores de radiancia espectral de la fuente, configurando un tiempo de integración adecuado, de manera que ningún píxel del sensor sature. Con estos datos se puede verificar la linealidad del sensor con la radiancia espectral.

De la misma manera, capturando imágenes para distintos tiempos de integración a un nivel de radiancia espectral de la fuente que no sature el sensor, se puede analizar el grado de linealidad del mismo con el tiempo de integración.

Las fuentes de ruido en un detector pueden variar dependiendo del dispositivo específico, su diseño y la electrónica de lectura y digitalización. Sin embargo, existen fuentes comunes a todos los sensores, que delimitan sus capacidades y describen su desempeño. Estas fuentes de ruido incluyen:

- *shot noise*, asociado a fluctuaciones estadísticas en la generación de fotoelectrones. Tiene una distribución de Poisson, de manera que su varianza es $\sigma_e^2 = \mu_e$.
- ruidos asociados a la lectura y amplificación de la señal, cuya distribución es normal con varianza σ_d^2 .
- ruido asociado al proceso de conversión analógica-digital, que presenta una distribución uniforme para todos los intervalos de cuantización y tiene una varianza de $\sigma_q^2 = \frac{1}{12}DN^2$ [74].

Una consecuencia importante de este modelo es que las variancias de todas las fuentes de ruido se suman de manera lineal. Luego, la varianza del ruido total se calcula por propagación de errores, resultando:

$$\sigma_y^2 = K^2(\sigma_e^2 + \sigma_d^2) + \sigma_q^2 \quad (4.6)$$

lo cual puede expresarse como:

$$\sigma_y^2 = K^2\sigma_d^2 + \sigma_q^2 + K(\mu_y - \mu_{y,dark}) \quad (4.7)$$

La ecuación (4.7) que relaciona la varianza del ruido σ_y^2 con la de la media de la señal que produce un píxel $(\mu_y - \mu_{y,dark})$ es utilizada en la caracterización del sensor en el método de transferencia de fotones [72].

Este parámetro describe la calidad de la señal producida por el sensor, y en el contexto del modelo que aquí se presenta se define como:

$$SNR = \frac{\mu_y - \mu_{y,dark}}{\sigma_y} \quad (4.8)$$

Utilizando las ecuaciones (4.7) y (4.6), se obtiene:

$$SNR(\mu_p) = \frac{\eta_q \mu_p}{(\sigma_d^2 + \sigma_q^2 / K^2 + \eta_q \mu_p)^{1/2}} \quad (4.9)$$

Esta cantidad depende principalmente de la eficiencia cuántica del detector y del ruido de la señal oscura σ_d y se espera que su respuesta cambie de un comportamiento lineal para niveles bajos de irradiación, a variar como la raíz cuadrada para altos niveles de irradiación [73]. La sensibilidad del sensor se define como el valor de irradiancia mínimo detectable, y puede estimarse a partir del SNR igualando este parámetro a 1.

Estos parámetros se determinan a partir de capturas de imágenes frente a

una fuente de radiancia espectral uniforme y variable y se requiere tener bien caracterizado el ruido del sistema previamente.

Un sensor que posee una cuantización k puede producir valores de DN entre 0 y $2^k - 1$. Sin embargo, la escala que en la práctica se puede utilizar es menor, ya que la señal oscura $\mu_{y,dark}$ debe ser mayor que cero para no obtener valores de DN negativos por efecto del ruido (esto generalmente implica la aplicación de un offset constante) y el valor máximo utilizable en DN es menor que $2^k - 1$ por la no uniformidad de la respuesta y los ruidos temporales.

Este rango entre valores mínimo y máximo de DN se caracteriza estimando el valor de señal de saturación μ_{sat} por un lado y la sensibilidad μ_{min} por el otro, de manera que el rango dinámico del sensor resulta:

$$DR = \frac{\mu_{sat}}{\mu_{min}} \quad (4.10)$$

La señal oscura μ_d es una cantidad que no es constante. La principal componente de la señal oscura son electrones térmicamente inducidos en el píxel. En consecuencia, esta señal oscura debe aumentar de manera lineal con el tiempo de integración, de manera que:

$$\mu_d = \mu_{d,0} + \mu_I t_{int} \quad (4.11)$$

donde μ_I es la denominada corriente oscura. Por propagación de errores, y teniendo en cuenta que los electrones inducidos térmicamente presentan una distribución de probabilidad de Poisson, se tiene que la varianza de la señal oscura es:

$$\sigma_d^2 = \sigma_{d,0}^2 + \sigma_{term}^2 = \sigma_{d,0}^2 + \mu_I t_{int} \quad (4.12)$$

Si el instrumento tiene una compensación por corriente oscura, debe ser caracterizada utilizando la ecuación (4.12). Esta señal depende a su vez de la temperatura a la que se encuentra el sensor, por lo que esta cantidad debe ser determinada para distintas temperaturas.

Cabe notar que para la caracterización del ruido del sensor se distinguieron dos parámetros: el denominado corriente oscura térmica y la señal oscura. La corriente oscura se refiere a los electrones que quedan atrapados en los pozos de potencial y que fueran generados por efecto de la agitación térmica de los átomos del material del sensor. Este parámetro varía exponencialmente con la temperatura, de manera que a mayor temperatura mayor es la cantidad de cargas atrapadas que suman al piso de ruido del sensor CCD.

La señal oscura en cambio, definida como μ_d , es un parámetro que considera todas las cargas no deseadas que quedan atrapadas en los pozos de potencial del material semiconductor en ausencia de luz, incluida la corriente oscura antes mencionada. Este parámetro varía linealmente con el tiempo de integración ya que cuanto mayor sea este tiempo mayor es la probabilidad de que los electrones queden atrapados en los pozos de potencial, y además tiene la dependencia exponencial con la temperatura dada por la corriente oscura [72].

Pueden existir diferencias en la respuesta de cada uno de los píxeles del sensor. Estas diferencias frecuentemente reciben el nombre de *fixed pattern noise* (FPN). Sin embargo, estas inhomogeneidades no constituyen un ruido y generalmente se refiere a ellas como no uniformidades, dado que presentan una distribución aleatoria entre píxeles del sensor.

Existen dos tipos de no uniformidades básicas. Por un lado la denominada no uniformidad de señal oscura (DSNU), que representa la variación de esta señal de píxel a píxel. Por otro lado, las variaciones de la sensibilidad entre píxel y píxel, llamada *photo response nonuniformity* (PRNU). Estas no uniformidades deben ser caracterizadas, buscando determinar si su variación tiene alguna dependencia espacial (gradual, periódica, aleatoria).

Es conveniente además identificar píxeles cuya respuesta sea significativamente diferente a la media. Estos píxeles, denominados defectuosos, pueden exhibir una respuesta mayor y creciente con el tiempo de integración (hot pixel), tener una sensibilidad mayor o bien no mostrar ninguna respuesta, independientemente del nivel de señal o del tiempo de integración.

Este trabajo no pretende enfatizar sobre un método específico para la caracterización del sensor. Lo mostrado anteriormente es sólo un ejemplo de cómo puede modelarse la señal que produce y algunos parámetros relevantes que resulta conveniente caracterizar en el contexto de un proceso de calibración.

4.3.2 Caracterización del sistema

Existen otros parámetros que es conveniente caracterizar a nivel sistema, considerando el instrumento como un todo, a fin de incorporar las interacciones entre los distintos componentes del mismo.

Es posible determinar valores para el SNR del sistema, considerando todas las fuentes de ruido, incluyendo ruidos debido a la electrónica de lectura del sensor, a la agitación térmica de los átomos que componen el material del sen-

sor, pero también pérdidas en la transmisión a lo largo del camino óptico. Para mejorar este parámetro se pueden incorporar correcciones a las aberraciones del sistema óptico o disminuir la cantidad de componentes ópticos.

En este caso, se calcula como el cociente entre la señal media que ingresa al instrumento a través del plano de entrada de la lente y el ruido total del sistema, que incluye la desviación estándar de la señal y el ruido inherente del sensor. La señal de entrada puede provenir de una fuente natural, como el Sol, o artificial, como una lámpara halógena cuyo espectro es conocido.

El desempeño radiométrico del sistema se caracteriza usualmente por cantidades equivalentes como la radiancia espectral equivalente al ruido (NESR por sus siglas en inglés) que se define como la radiancia espectral que equivale al ruido total del sistema y se puede calcular tomando $SNR=1$.

El límite principal del error es el ruido aleatorio. Si todas las demás fuentes de ruido se redujeran a cero, el ruido restante sería gaussiano, principalmente Johnson o *shot noise* asociado con el detector. Un sistema en el que el ruido predominante es el aleatorio es deseable, pues significa que todos los ruidos sistemáticos son conocidos y controlados. En un sistema de este tipo, la incerteza asociada a la medición es inversamente proporcional al SNR, o:

$$incerteza \approx \frac{1}{SNR} \quad (4.13)$$

Las cámaras hiperespectrales sufren de errores de registro espectral y espacial. Estos artefactos evitan la adquisición precisa de espectros y, por lo tanto, reducen la precisión de la clasificación de los materiales presentes en la escena capturada. Estos errores de registro se cuantifican mediante el *smile* y *keystone*.

Estos dos parámetros describen de que manera se ve distorsionada la imagen de la rendija de entrada al ser proyectada sobre el sensor. Estas distorsiones provienen de problemas de ensamblaje y alineación principalmente. En el caso de instrumentos con geometría tipo *pushbroom*, la imagen ideal de la rendija de entrada, una vez que atravesó el elemento óptico dispersivo, es un rectángulo con la dimensión espacial paralela a la rendija y la dimensión espectral perpendicular a la misma.

El *smile* (ver *Figura 4.5*) es una distorsión en la dimensión espectral, un desplazamiento en longitud de onda entre distintos puntos a lo largo de la rendija. Es característico de este tipo de instrumentos, pero puede verse exagerado por falta de alineación o foco. Como consecuencia de este efecto, la longitud de onda de la radiación que incide en los píxeles de una fila del sensor varía entre

columnas. Este efecto se evidencia por una curvatura en la imagen de la rendija que se genera en el FPA. Si este efecto es acentuado, puede llevar a una clasificación errónea de los materiales presentes en la escena capturada.

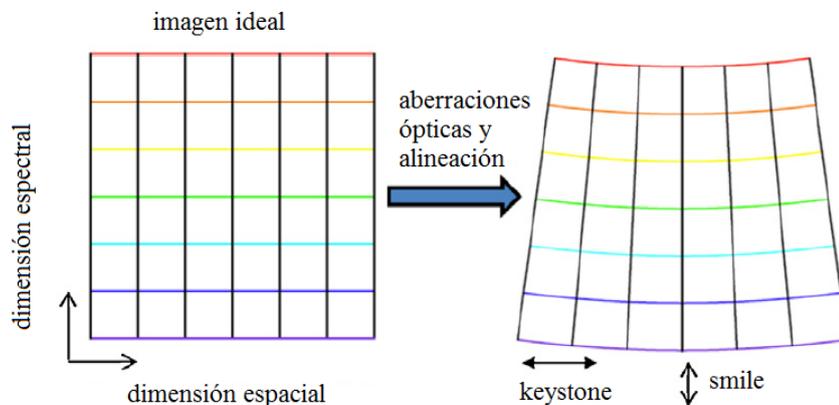


Figura 4.5. Ejemplo de imagen ideal e imágenes que presentan distorsiones *smile* y *keystone* (imagen adaptada de [75]).

Por otro lado, *keystone* (ver *Figura 4.5*) es una distorsión espacial entre imágenes que pertenecen a distintas bandas espectrales. Se evidencia como un ensanchamiento o reducción en la dirección de la rendija dando como resultado una imagen en forma de trapecioide. Este efecto puede verse acentuado por una alineación o foco inadecuado. Como la imagen se proyecta en un píxel rectangular del sensor, esta distorsión puede resultar en la detección en distintos píxeles del FPA de distintas longitudes de onda de una misma posición en la escena.

La caracterización del *smile* puede realizarse a partir de la calibración espectral del instrumento, al asignar a cada píxel de una fila un valor de longitud de onda, graficando las diferencias. El *keystone* se puede medir utilizando una fuente como una lámpara halógena para formar la imagen de una secuencia de puntos angostos a lo largo de la rendija de entrada. Esto resulta en una imagen compuesta de una secuencia de líneas verticales sobre el FPA. Midiendo la desviación de las líneas de la vertical permite cuantificar este efecto.

En general, el fabricante del instrumento realiza una caracterización minuciosa de estas distorsiones. A menos que se introduzcan cambios en el instrumento, o este sufra un shock físico o algún otro evento que produzca una pérdida de la alineación, estos efectos no son significativos.

4.4 Calibración espectral

Una vez realizada la caracterización del instrumento, el siguiente paso es la calibración espectral del mismo. En el caso de las cámaras hiperespectrales esta calibración es muy importante, pues al contar con un número de bandas o canales espectrales contiguos muy grande (100 o más), la posibilidad de reconstruir un espectro a partir de los datos crudos recae en poder asignar una longitud de onda a cada banda de manera precisa. Esta calibración antecede a la radiométrica.

La calibración espectral se refiere a la determinación del centro de banda y resolución espectral para cada elemento del sensor. Para realizar una calibración espectral completa, el instrumento debe ser iluminado con un monocromador que permite seleccionar una longitud específica para la luz que emite, con un ancho de banda estrecho. Este tipo de fuente de referencia puede ser configurada para emitir en longitudes de onda en todo el rango espectral del instrumento con un muestreo espectral suficientemente fino. La longitud de onda central de cada píxel del sensor se determina como aquella que produce la máxima respuesta. El ancho de banda de la respuesta medida es el resultado de la convolución de la respuesta espectral del instrumento con la del monocromador. Si esta última tiene un ancho de banda suficientemente angosto, el ancho de banda medido corresponde aproximadamente a la resolución espectral del instrumento, para la longitud de onda considerada. Esta resolución espectral representa la mínima diferencia entre dos longitudes de onda que puede distinguir el instrumento. Sin embargo, este método resulta difícil de implementar en la práctica, debido al gran número de píxeles que posee usualmente un sensor.

Otra manera de estimar la respuesta espectral del sistema requiere utilizar una fuente de espectro conocido, que posea líneas espectrales bien definidas y conocidas. A partir de imágenes capturadas con el instrumento frente a la fuente se ajusta a los picos observados en estas una función que se entiende es la que mejor ajusta su forma. En general esta función es una Gaussiana (ver *Figura 4.6*). Se calcula el máximo matemático de la función y a su posición (fila) se le asigna la longitud de onda que corresponde a la línea espectral de la fuente. Una vez que se ha ubicado el centro de todas las líneas espectrales de la fuente y se les ha asignado un número de fila, se realiza un ajuste de un polinomio de grado 3 o 4 a los datos de longitud de onda vs. fila. Como resultado se obtienen coeficientes de calibración espectral para cada columna del sensor, que permiten convertir el número de fila en longitud de onda. Por otro lado, utilizando la misma función ajustada a los datos, se determina el FWHM (*Full WidthHalf Maximum*, ver *Figura 4.6*) y se asigna como resolución espectral este valor, que puede variar

para distintas longitudes de onda.

La resolución espectral determinada mediante este método implica que en la práctica el instrumento cuenta con un número de bandas espectrales menor al número de filas que posee el sensor. Esto ocurre porque la resolución para cada elemento del sensor abarca varias filas. La conformación final de bandas se realiza principalmente en función de la aplicación en la que se utilizará el instrumento.

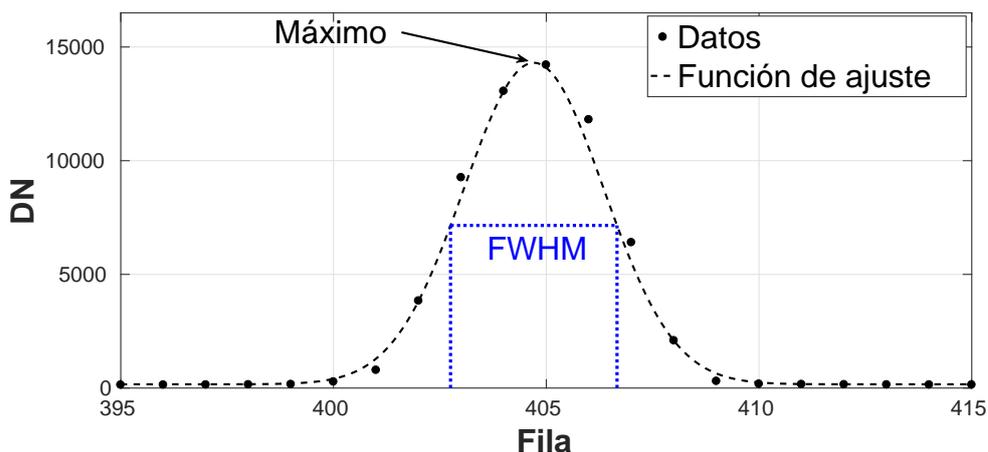


Figura 4.6. Determinación de resolución espectral a partir del cálculo de FWHM de la función gaussiana ajustada a los datos.

Una vez realizada esta calibración, se puede estimar un error en la determinación de la longitud de onda utilizando una fuente de espectro conocido distinta a las utilizadas para la calibración. Para esto se compara la longitud de onda calculada mediante los coeficientes de calibración espectral con la longitud teórica de la fuente y se asigna como error la diferencia entre las dos. Este error no es constante para cada columna, debido a efectos de *keystone*. Por lo tanto, la calibración espectral y la determinación de su error deben ser realizadas para las distintas columnas del sensor.

4.5 Calibración radiométrica

Como se mencionara anteriormente, la calibración radiométrica implica establecer una relación entre la radiancia espectral en el plano de entrada del instrumento y la imagen en DN obtenida a la salida del mismo, incluyendo incertezas. Esta relación generalmente se deriva del modelo planteado para el sensor. En el caso de cámaras con detectores tipo CCD, los fotoelectrones generados por

un determinado píxel del FPA tienen usualmente un comportamiento lineal con la radiancia espectral, de manera que de forma general se tiene [1]:

$$DN(i, j) = gL_{\lambda}(i, j) + d \quad (4.14)$$

donde $DN(i, j)$ representan los datos crudos generados por el píxel (i, j) usualmente expresados en cuentas digitales o DN, $L_{\lambda}(i, j)$ representa la radiancia espectral, g es el coeficiente de ganancia efectivo del sistema y d es un *offset* de señal oscura del sistema.

Esta ecuación, planteada para cada uno de los píxeles del sensor, es la forma más simple de relación que puede plantearse. Sin embargo, los sensores reales exhiben un cierto nivel de no uniformidad, que puede ser modelado como una variación aleatoria en la ganancia y el *offset* entre los píxeles del FPA. A fin de compensar estas no uniformidades, se plantea una calibración píxel a píxel.

Luego, para poder determinar los coeficientes de ganancia y *offset* para cada uno de los píxeles del sensor, se requiere comparar la señal en DN producida por el instrumento cuando es iluminado por una fuente de radiancia espectral conocida y calibrada. Cabe notar que en el planteo de esta ecuación se asume que los coeficientes de ganancia y *offset* son constantes en el tiempo, y que el ruido no está correlacionado entre dos mediciones.

Una vez calculados estos coeficientes, la radiancia espectral calibrada se obtiene a partir de los datos crudos del instrumento como:

$$L_{\lambda}(i, j) = \frac{DN(i, j) - d(i, j)}{g(i, j)} \quad (4.15)$$

Las incertezas asociadas a esta radiancia espectral calibrada se obtienen mediante propagación de errores, contemplando incertezas en los coeficientes de ganancia y *offset* y la incerteza de los datos crudos producidos por la cámara.

La ecuación (4.14) implica un comportamiento lineal de la respuesta del instrumento con la radiancia espectral. Esta dependencia debe ser comprobada una vez realizada la calibración. El apartamiento del sensor del comportamiento lineal constituiría un ruido asociado a la no uniformidad y no linealidad del FPA, que debe ser tenido en cuenta al momento de determinar si la ecuación (4.14) resulta aplicable al caso particular.

Si ese no fuera el caso, se pueden plantear modelos de orden mayor, teniendo en cuenta que esto vuelve más complejo al modelo y que se requerirán un mayor número de datos para la determinación de los coeficientes de calibración. En este

sentido, plantear modelos más complejos sólo se justifican si se demuestran no linealidades del sensor significativas con respecto al ruido total del sistema.

5

Metodología para calibrar una cámara hiperespectral

La calibración en laboratorio de una cámara hiperespectral es un proceso que requiere instalaciones, equipos de soporte, fuentes de referencia e instrumentos específicos, así como personal calificado para su realización. Durante este proceso se generan abundantes datos que deben ser procesados y sus resultados analizados y documentados de manera crítica, consistente y ordenada, para que resulten útiles para la misión. Por un lado, es deseable que este proceso sea eficiente en términos de costos, tiempo y recursos a utilizar. Por otro lado, el éxito de la calibración depende de la calidad y confiabilidad de sus resultados. A fin de balancear estas dos condiciones, es conveniente contar con una metodología para implementar el proceso de calibración que permita un dimensionamiento y un seguimiento adecuados de las tareas que se deben realizar.

Con este propósito, en este capítulo se sientan las bases de una metodología para la realización de la calibración en laboratorio de una cámara hiperespectral que conforma la carga útil de un satélite. Esta propuesta resulta una guía de referencia orientada a la elaboración de un plan de calibración en laboratorio. La organización que se propone para el proceso de calibración permite identificar roles y responsabilidades, así como interacciones entre actores involucrados, documentación a ser generada, entregables, tareas auxiliares que dan soporte y permiten la realización de la calibración en sí misma e instancias de evaluación del progreso de la calibración, entre otros.

Cabe remarcar que cada proceso de calibración depende fuertemente de las particularidades de la cámara específica, de las aplicaciones para las cuales ha sido seleccionada y del proyecto en sí mismo. Por consiguiente, la metodología

que se propone intenta generalizar sobre aspectos en común, a fin de brindar pautas para la implementación de la calibración en laboratorio. El detalle de cada actividad a realizar debe ser definido para cada caso particular.

5.1 Propósito y alcance de la metodología

Esta metodología aplica a instrumentos hiperspectrales que conforman la carga útil de un satélite. Es decir, aplica a misiones satelitales en las cuales se ha considerado que una cámara hiperspectral es la mejor solución para las aplicaciones que se desea desarrollar. El instrumento en sí mismo puede ser resultado de un proceso de diseño y fabricación específico para la misión, o tratarse de un instrumento seleccionado y adquirido a un fabricante externo al proyecto. Esta selección se realiza en base a especificaciones establecidas a partir de requerimientos de misión, de ciencia, u otros requerimientos que puedan afectar el desempeño de la cámara.

Esta metodología es una guía de referencia para la implementación de la calibración en laboratorio de una cámara hiperspectral. Está orientada a la elaboración de un plan de calibración en laboratorio, aunque contempla además todas aquellas actividades que permiten alcanzar un conocimiento detallado del funcionamiento y desempeño del instrumento. En este sentido, establece pautas útiles para la organización y gestión de un proceso de calibración de un instrumento hiperspectral a partir de la descripción de conceptos y procesos generales.

Esta metodología está pensada para ser aplicada a proyectos que adoptan una organización en fases, como la presentada en la *Sección 2.2*, incorporando instancias de evaluación de la calibración en base a criterios previamente establecidos. En este sentido, la calibración de laboratorio ocupa el lugar descrito en la *Sección 2.5*. Esto implica que en el contexto de esta metodología la calibración es a nivel sistema, es decir, las experiencias se realizan sobre un instrumento construido e integrado. El objetivo de esta calibración es fijar una base de prelanzamiento del comportamiento espectral y radiométrico de la cámara.

5.2 Roles y responsabilidades

La calibración de una cámara hiperspectral en el contexto de un proyecto satelital involucra la participación de diversos actores, cada uno desempeñando

un rol específico. El éxito del proceso de calibración requiere la coordinación e interacción entre estos roles, que deben ser identificados y asignados desde etapas tempranas del proyecto. En la *Tabla 5.1* se presentan los roles específicos al proceso de calibración en laboratorio y una descripción de sus responsabilidades más relevantes y en la *Figura 5.1* se muestra un esquema de las relaciones e interacciones propuestas para el desarrollo del proceso de calibración.

Tabla 5.1. Roles que intervienen en el proceso de calibración y sus responsabilidades más relevantes.

Rol	Descripción de responsabilidades
Grupo de calibración	Es el responsable de la elaboración de requerimientos para la calibración, de las especificaciones para el laboratorio, y del plan de calibración.
Laboratorio de calibración	Instalaciones donde se realizan las experiencias de calibración. Cuenta con capacidad de control ambiental y de contaminación, instrumentos de medición, fuentes de referencia y equipos de soporte para la adquisición de datos para la calibración. Responsable de la gestión y mantenimiento de la calibración de las fuentes de referencia.
Responsable del instrumento	Grupo de ingeniería responsable del diseño, desarrollo y fabricación del instrumento. Habilitado para la manipulación y operación del instrumento durante las experiencias de caracterización y calibración. Si el instrumento fuera provisto por un fabricante externo al proyecto, este sería el responsable del mismo, hasta su entrega al proyecto.

El laboratorio donde se llevan a cabo las experiencias de calibración no pertenece necesariamente a la institución o agencia que lleva adelante el proyecto. Esto implica que se debe gestionar un acuerdo entre el proyecto y el responsable de estas instalaciones, que incluya especificaciones sobre infraestructura, condiciones ambientales, instrumentos y fuentes de referencia necesarias para la calibración. Este acuerdo debe incluir un cronograma tentativo, el cual debe estar de acuerdo con el plan de calibración.

Las especificaciones para el laboratorio de calibración deben ser elaboradas por el grupo de calibración y sometidas a revisión por parte de dicho laborato-

rio. Este aporta su experiencia y conocimiento en procesos de calibración para constatar que dichas especificaciones pueden ser cumplidas. En este caso, el grupo de calibración cumple una función de asesor, verificando las características de las fuentes de referencia con las que cuenta el laboratorio y la vigencia de sus certificados de calibración provistos por el laboratorio, para asegurar que son adecuados para la tarea.

En el caso del responsable del instrumento, existen dos posibilidades para el desempeño de este rol. Si el instrumento fuera provisto por un fabricante externo, este es el responsable del instrumento hasta su entrega al proyecto. Si el instrumento fuera diseñado, desarrollado y fabricado como parte del desarrollo del proyecto, el responsable del instrumento es el grupo de ingeniería a cargo de dichas tareas. En cualquier caso, sólo el responsable del instrumento está habilitado para manipularlo y operarlo.

El grupo de calibración participa en todas las instancias de la calibración, desde la preparación hasta la ejecución y el posterior análisis de los resultados. Su tarea es la de elaborar requerimientos para la calibración, desarrollar la base teórica sobre la cual se fundamenta el proceso y proponer un plan para la calibración, entre otras. Cada tarea requiere un intercambio fluido con los otros dos actores. El grupo de calibración elabora y luego somete a consideración de los otros dos actores para que el producto tenga el mayor acuerdo posible entre los involucrados en la calibración.

La tarea más importante del grupo de calibración es la de generar reportes de resultados que además contengan un análisis crítico de los mismos, a fin de que estos sean útiles para la toma de decisiones. La revisión y aprobación de cada actividad o documento generado recae en la jefatura del proyecto, con acuerdo del PI.

Estos otros roles que tienen participación en el proceso de calibración son la jefatura del proyecto y el grupo de ciencia o PI (*Principal Investigator*). La gerencia del proyecto es la encargada de la planificación y el control del proyecto en general. Es la principal responsable de la gestión de la calibración en laboratorio y la toma de decisiones, en particular, en casos de contingencias que puedan representar un riesgo al éxito de la calibración. Entre sus atribuciones se encuentra además la asignación de roles, entre los cuales se sugiere que se incluyan los presentados en la *Tabla 5.1*. Es responsable de definir las instancias de revisión, en las cuales se evalúa el progreso y los resultados de la calibración.

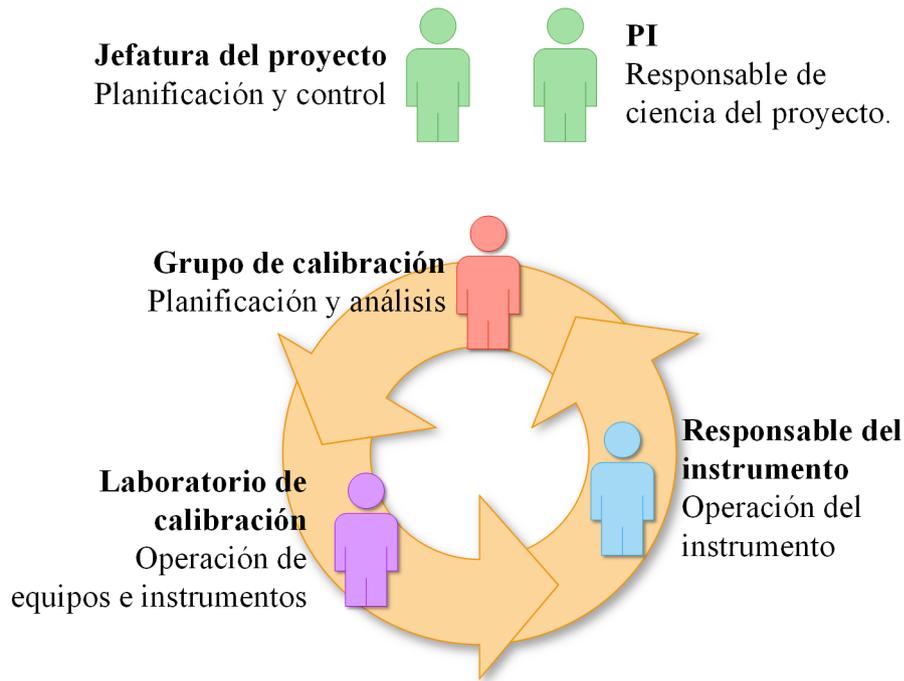


Figura 5.1. Roles involucrados en el proceso de calibración y relaciones entre ellos. Tanto el laboratorio donde se realizan las experiencias de calibración como el responsable del instrumento pueden, en principio, no pertenecer al proyecto.

Por último, el PI es el responsable de los desarrollos de ciencia y el que posee una comprensión más acabada de las aplicaciones de los datos generados por el instrumento. Su interacción con el grupo de calibración es fundamental en etapas de definición de requerimientos de calibración.

5.3 Etapas del proceso de calibración

En el *Capítulo 4* se presentaron los fundamentos teóricos que sustentan un proceso de calibración de una cámara hiperespectral. La distinción entre las distintas tareas a realizar para convertir el dispositivo electro-óptico que es una cámara hiperespectral en un instrumento de medición de radiancia espectral, representa un modelo del proceso de calibración. Sobre este modelo, que distingue tres actividades principales, la caracterización de la cámara, la calibración espectral y la calibración radiométrica, se realiza la siguiente propuesta metodológica.

Tabla 5.2. Etapas propuestas para el proceso de calibración en laboratorio de una cámara hiperespectral.

Etapas	Descripción
Definición de requerimientos de calibración	A partir de requerimientos de misión y de ciencia, restricciones del proyecto y requerimientos ambientales. Esta etapa involucra estudios de compromisos entre aspectos técnicos y programáticos del proceso de calibración, buscando producir un plan de calibración que permita obtener una calibración confiable, minimizando costos, tiempos, riesgos e incertezas. Los requerimientos de calibración establecen las condiciones en que debe realizarse la calibración.
Caracterización en laboratorio del instrumento	Realización de experiencias que permitan cuantificar parámetros asociados al desempeño del mismo. Esta caracterización es fundamental para la calibración radiométrica pues en ella se fundamenta la elección del modelo radiométrico a utilizar.
Calibración espectral	Experiencias cuyo objetivo sea conocer la respuesta en longitud de onda del instrumento, asignando a cada píxel del sensor un valor de longitud de onda. Esta experiencia también permite cuantificar otros parámetros espectrales, como resolución espectral y número efectivo de bandas.
Calibración radiométrica	Experiencia durante la cual se establece una correspondencia entre las mediciones del instrumento y un estándar o patrón, incluyendo incertezas asociadas. Como resultado, es posible obtener una imagen en radiancia espectral calibrada a partir de los datos crudos en DN que genera el instrumento.

A fin de implementar la calibración en laboratorio y elaborar un plan de calibración se propone dividir el proceso en las siguientes etapas: elaboración de requerimientos de calibración, caracterización en laboratorio del instrumento, calibración espectral y calibración radiométrica. Cada una de estas etapas tiene un objetivo particular y un conjunto de tareas específicas que deben ser ejecutadas (ver *Tabla 5.2*). Esta división en etapas facilita la organización, gestión y evaluación del proceso al dividirlo en paquetes de trabajo, y permite coordinar

las actividades de calibración con el desarrollo del propio proyecto.

Cada una de estas etapas requiere un conjunto de tareas auxiliares que proveen soporte a las distintas experiencias y deben planificarse e implementarse con anterioridad. Entre ellas se distinguen: la elaboración de especificaciones para la adecuación del laboratorio en el que se realizarán las experiencias; el acondicionamiento de fuentes y seguimiento del estado de sus certificados de calibración; la elaboración de procedimientos para la adquisición de datos; el desarrollo de software específico para el control del instrumento y la adquisición de datos y la realización de un sistema de almacenamiento y organización de los datos generados durante las distintas etapas de la calibración. El desarrollo de estas tareas debe estar contemplado en el plan de calibración y explicitado en el cronograma del proceso, asignando márgenes de tiempo adecuados, de acuerdo a la madurez del proyecto y al estado de avance de la calibración.

La decisión de ejecutar las tareas correspondientes a una determinada etapa se toma sobre la base de un análisis del estado de preparación de los elementos involucrados, documentos y personal calificado para las distintas tareas. Por otro lado, la decisión de dar por finalizada una etapa depende de un análisis de los resultados y de su contraste con los objetivos fijados para esa etapa. Luego, para cada etapa se deben establecer un conjunto de objetivos y criterios de éxito que serán evaluados en estos puntos de decisión.

En las secciones siguientes se describen las etapas propuestas para la implementación de la calibración en laboratorio, precisando las tareas específicas de la calibración que corresponde realizar en cada una, tareas auxiliares, actores involucrados, documentación a generar, entregables e instancias de evaluación del progreso que permitan decidir si resulta conveniente avanzar en el proceso o no.

5.3.1 Requerimientos para la calibración

La derivación de requerimientos de calibración a partir de requerimientos de misión, de ciencia y restricciones del proyecto implica un estudio de compromisos cuyo objetivo es determinar el abordaje más conveniente del proceso, que minimice riesgos, costos, tiempos e incertezas, sin resignar calidad y confiabilidad de los resultados (ver *Figura 5.2*). La definición de requerimientos para la calibración es el paso inicial del proceso de calibración y junto con los requerimientos de desempeño del instrumento que se desea verificar, son fundamentales para la elaboración de un plan.

Esta primera etapa del proceso de calibración implica interpretar los requerimientos de desempeño del instrumento que se desean verificar y derivar requerimientos para la implementación de dicho proceso. Estos últimos describen las condiciones en que debe realizarse la calibración, cuantificando parámetros relacionados con las condiciones ambientales y de operación del instrumento, a fin de que se satisfagan los requerimientos de misión y de ciencia y, por supuesto, de desempeño del instrumento. Entre estos parámetros se distinguen: el rango espectral, el número de bandas, el rango dinámico, la resolución radiométrica, el SNR y las incertezas.

También deben analizarse las condiciones ambientales como el rango de temperaturas de operación, la configuración de la electrónica del instrumento, el tiempo de vida útil y todo otro parámetro asociado a la configuración en la que operará el instrumento durante la misión. Una vez identificados, estos parámetros deben ser cuantificados, a fin de conformar los requerimientos para la calibración.

La posibilidad de realizar un análisis adecuado y transformar requerimientos de más alto nivel en requerimientos para la calibración depende fundamentalmente de contar con una base de conocimiento lo suficientemente amplia sobre cámaras hiperespectrales y su calibración. Es necesario también contar con una comprensión detallada de la aplicación para la cual se pretende utilizar el instrumento. En este sentido, en el *Capítulo 4* se desarrollaron fundamentos sobre calibración en general y sobre calibración de cámaras hiperespectrales en particular, con el objetivo de aportar a esta base de conocimiento. Para lo segundo, es indispensable una interacción con el equipo de ciencia del proyecto, quienes entienden mejor las mediciones que son necesarias realizar, y son los responsables de identificar y desarrollar los productos de ciencia de la misión y las herramientas que faciliten el uso de la información generada con el instrumento.

Al momento de realizar esta cuantificación es conveniente considerar rangos y configuraciones que no sólo contengan aquellas condiciones de uso esperadas, sino plantear condiciones para la calibración más abarcativas. De esta manera, por ejemplo, el rango dinámico en el que se realizará la calibración radiométrica no sólo debe incluir el rango esperado de radiancias espectrales de acuerdo a la aplicación, sino que debe incorporar un margen adecuado en función de la confianza que se tiene en el rango esperado antes definido, en la madurez de la misión y la aplicación y en la experiencia en calibración de cámaras hiperespectrales. Esta inclusión de un margen para los parámetros de calibración permite adquirir confianza en el desempeño del instrumento en condiciones esperadas de uso, pero además abarcar posibles situaciones de contingencia que exceden los rangos de operación establecidos. De esta manera, el peso mayor recae sobre la

calibración en laboratorio, de manera de simplificar y reducir la calibración en órbita, la cual resulta más costosa desde el punto de vista de recursos necesarios y tiempo operativo del instrumento.

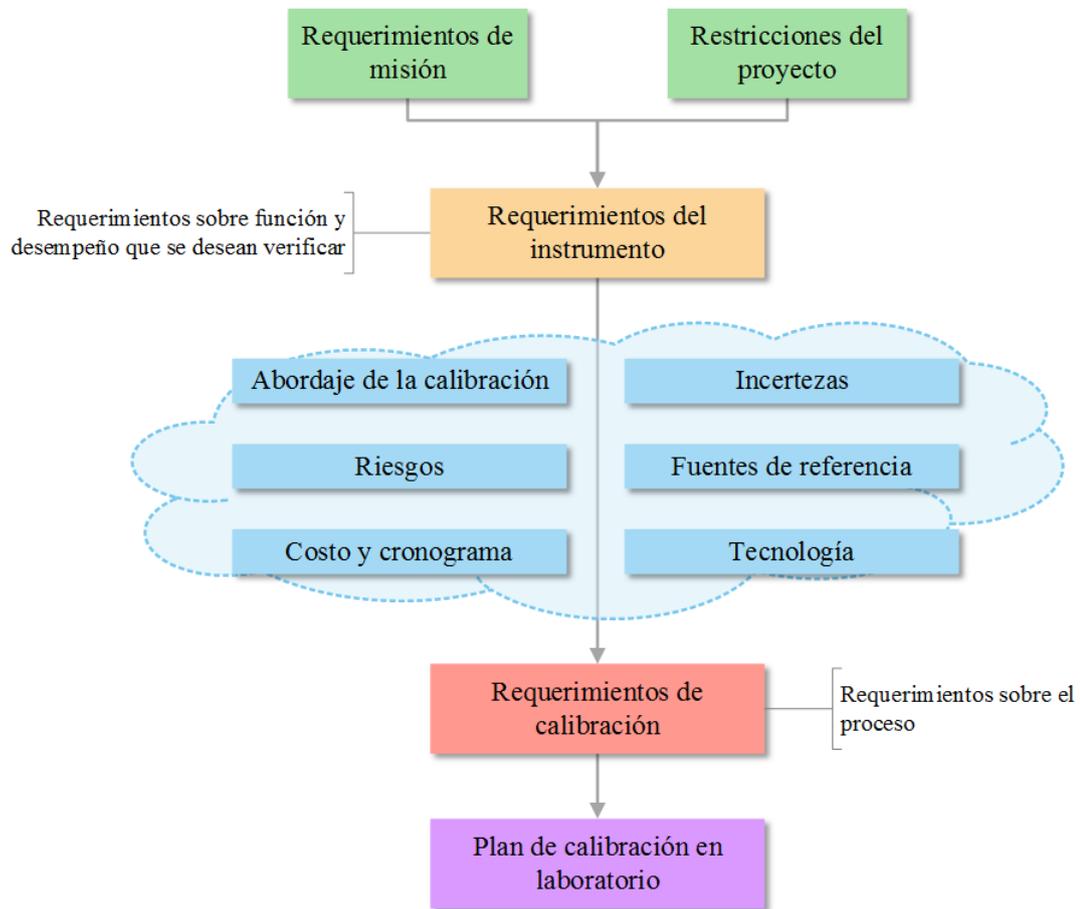


Figura 5.2. Derivación de requerimientos de calibración y elementos involucrados en estudios de compromisos a fin de elaborar un plan de calibración de laboratorio.

En resumen, los requerimientos de calibración cuantifican parámetros para la calibración, especifican márgenes apropiados y definen incertezas con las que se deben medir y reportar los resultados. De esta manera, plantean requerimientos sobre el instrumental y condiciones ambientales del laboratorio. El cumplimiento de estos requerimientos es responsabilidad del personal responsable del laboratorio en el cual se realizan las experiencias de calibración. Es aconsejable realizar un presupuesto de incertezas que contemple cada paso de las mediciones a realizar, así como precisiones de los instrumentos y fuentes utilizados para la caracterización y calibración, a fin de contar desde el comienzo del proceso con estimaciones que permitan asegurar que se cumplirán los requerimientos de calibración.

Además de guiar el proceso de calibración, estos requerimientos establecen límites de validez para los resultados obtenidos. Estos requerimientos, una vez definidos, deben ser reportados en un documento de requerimientos de calibración que conforma el entregable principal de esta etapa del proceso. Este documento es la fuente principal de información a partir de la cual se elaboran las especificaciones para la adecuación del laboratorio y las especificaciones y procedimientos para la adquisición de datos en etapas posteriores.

La elaboración de requerimientos recae en el grupo de calibración principalmente, pero es indispensable interactuar con el equipo de ciencia e incluso con el responsable del instrumento, quien es el que en estas instancias cuenta con el conocimiento más detallado del instrumento. Los requerimientos de calibración deben ser elaborados de manera preliminar en etapas tempranas del proyecto, revisados en instancias de evaluación de requerimientos de más bajo nivel del proyecto y aprobados antes de comenzar las experiencias en laboratorio.

Tabla 5.3. Resumen de la etapa de definición de requerimientos.

Etapa	Definición de requerimientos para la calibración
Principales tareas a realizar	Definición de requerimientos para la calibración en laboratorio.
Roles involucrados y sus responsabilidades	Grupo de calibración: elaboración de marco teórico para la calibración; elaboración de requerimientos de calibración. Esta última tarea requiere interacción con el responsable del instrumento y el laboratorio de calibración.
Entregables	Documento de requerimientos de calibración. Documento con marco teórico para la calibración de la cámara hiperspectral.

Asimismo, es necesario contar con una valoración de las necesidades tecnológicas y las posibilidades de contar con equipos, fuentes e instalaciones apropiadas para el proceso, a fin de plantear requerimientos de calibración que sean accesibles y verificables. En esta instancia es indispensable la interacción con el laboratorio de calibración, quien debe asegurar el funcionamiento bajo estándares de todo los equipos y el control ambiental durante las experiencias de adquisición de datos para la calibración.

En la *Tabla 5.3* se resumen los aspectos más relevantes de esta etapa del proceso de calibración. La terminación de esta etapa ocurre cuando se congelan

los requerimientos. Esto sucede luego de una revisión de requerimientos en la cual se aprueba el documento de requerimientos. Este servirá de fundamento para la elaboración de las especificaciones para cada una de las siguientes etapas. Por lo tanto, es importante dedicar esfuerzos a realizar una definición de requerimientos detallada y cuidadosa.

5.3.2 Caracterización del instrumento

Esta etapa denominada caracterización del instrumento tiene por objetivo generar una descripción funcional completa del mismo y sus componentes. Esta etapa es difícil de delimitar, pues la caracterización del instrumento comienza desde el diseño mismo y se extiende durante la fabricación e integración. Si se establece la necesidad de una caracterización detallada de uno o más componentes de la cámara, es posible que sea necesario contemplar pruebas durante dichas fases.

Si el instrumento fuera provisto por un fabricante externo, es conveniente realizar pruebas de aceptación, para verificar que las especificaciones técnicas reportadas por el fabricante se cumplen. En este caso, la caracterización en laboratorio tiene por objetivo verificar y/o ampliar estas especificaciones, a fin de conocer y registrar todos los pormenores del instrumento.

En cualquier caso, la caracterización en laboratorio de la cámara implica la realización de un conjunto de pruebas que permiten cuantificar parámetros de desempeño de la misma. Algunos de estos parámetros son definidos explícitamente en requerimientos de calibración, otros pueden resultar necesarios para poder evaluar estos últimos o porque en sí mismos proveen información relevante sobre el instrumento. Entre estos parámetros se distinguen las medidas linealidad, ruido y no uniformidad del sensor, sus rangos dinámico y espectral, la resolución espectral, la cuantización y el SNR en el rango espectral. También es necesario realizar la caracterización de *straylight* y efectos como *keystone* y otras perturbaciones introducidas por aberraciones de la óptica o errores en el alineamiento interno del instrumento, píxeles anómalos, etc. En la *Tabla 5.4* se presenta un resumen de la etapa, especificando aspectos comunes a un proceso de caracterización de una cámara hiperespectral.

Algunos de estos parámetros a caracterizar fueron presentados en el *Capítulo 4*, en el cual se expuso también un conjunto de buenas prácticas desarrolladas a partir de numerosas y diversas caracterizaciones de cámaras hiperespectrales. Es aconsejable incluir estas buenas prácticas en la base de conocimiento sobre la

cual se fundamenta la caracterización del instrumento.

Tabla 5.4. Resumen de la etapa de caracterización del instrumento.

Etapa	Caracterización del instrumento
Principales tareas a realizar	Caracterización de linealidad, ruido y no uniformidades del instrumento. Desarrollo de un modelo radiométrico del instrumento.
Tareas auxiliares	Elaboración de especificaciones para las pruebas y procedimientos para la adquisición de datos. Adecuación del laboratorio. Desarrollo e implementación de software de control del instrumento para la caracterización. Desarrollo e implementación de sistema de almacenamiento de datos.
Roles involucrados y sus responsabilidades	Grupo de calibración: elaboración de especificaciones y supervisión de las experiencias; procesamiento de datos y análisis de resultados; elaboración de reporte. Grupo de operadores del laboratorio: operación de equipos, instrumentos y fuentes. Responsable del instrumento: operación del instrumento.
Entregables	Reporte de la caracterización del instrumento. Modelo radiométrico.

La caracterización de la cámara abarca otros aspectos además de lo radiométrico y espectral. Por ejemplo, es conveniente caracterizar la degradación del instrumento por efectos ambientales o inherentes al uso de los componentes del mismo, a fin de estimar valores de fin de vida de los parámetros y así contar con una caracterización el instrumento a lo largo de su vida útil en órbita. En este sentido, es necesario realizar pruebas que permitan determinar los efectos de las condiciones ambientales como radiación solar, radiación de partículas, oxígeno atómico y variaciones térmicas, sobre el instrumento en general, y sobre el sensor, la óptica y la electrónica en particular. Estas pruebas se realizan generalmente en las fases de diseño y construcción del instrumento y deben ser reportadas en un conjunto de documentos que deben estar disponibles durante el proceso de calibración.

A fin de brindar flexibilidad y confiabilidad al proceso de calibración, es conveniente delimitar un conjunto mínimo e indispensable de pruebas para con-

siderar que la caracterización del instrumento ha sido exitosa, en caso de que sea necesario recortar los tiempos para esta fase. Estas pruebas se seleccionan principalmente en relación a los requerimientos de ciencia y del instrumento, a fin de garantizar que estos se verifiquen.

Una vez definidos los parámetros de interés, se elaboran especificaciones que incluyan requerimientos sobre estos parámetros, las condiciones en que deben ser caracterizados, la precisión con que deben ser medidos, la manera en que los resultados deben ser reportados, aunque no necesariamente especifican los métodos a ser aplicados para la caracterización. Estos requerimientos se derivan de requerimientos de misión, ciencia y calibración. Las configuraciones y rangos en que los parámetros deben ser caracterizados deben considerar todas las configuraciones de utilización del instrumento en órbita, siguiendo el principio de “*Test as you fly*”. En la práctica, una caracterización en condiciones ambientales similares a las que el instrumento experimentará en órbita puede ser muy costosa. Esto debe ser contemplado en el plan de calibración, evaluando la pertinencia y conveniencia de realizarla. En caso de que se determine que es indispensable realizar pruebas en condiciones ambientales representativas de las esperadas en órbita, se deben identificar factores que afectan el desempeño del instrumento y establecer valores extremos para las pruebas, que deben por lo menos abarcar condiciones nominales de operación del instrumento en órbita.

Uno de los resultados más relevantes de esta etapa es desarrollo de un modelo físico-matemático que describe el funcionamiento del instrumento, de entre aquellos que fueron considerados en etapas de diseño y validados a través del proceso de caracterización. Este modelo, que será luego nuevamente validado durante la calibración en laboratorio, permite definir una ecuación de calibración radiométrica que relaciona la radiancia espectral en el plano de entrada del instrumento con la señal en DN que genera el mismo.

El éxito de esta etapa requiere una interacción constante entre el grupo de calibración, el laboratorio donde se desarrollará la adquisición de datos para la caracterización del instrumento y el responsable del instrumento. Esta interacción debe suceder a través de medios y espacios provistos por el proyecto. El grupo de calibración es responsable de elaborar el plan y las especificaciones para luego someterlas a revisión por parte de los otros dos actores involucrados. Estos aportan su conocimiento y experiencia, el primero en el uso de los equipos e instrumental del laboratorio y el segundo en el funcionamiento y uso del instrumento. Su aporte es valioso para la definición de especificaciones y procedimientos factibles.

El grupo de calibración es responsable de la recopilación y análisis crítico de toda la información generada durante esta etapa, a fin de que resulte útil como guía y fundamento para la toma de decisiones. Esta compilación debe ser coherente y ordenada, para que sea útil para la calibración y el posterior uso del instrumento. La información debe ser incorporada a un único documento, en el cual se unifique la terminología y nomenclatura. Este documento debe reportar los resultados de la caracterización junto con sus incertezas y hacer referencia a la configuración y el método con los que cada parámetro fue determinado. Esta información puede complementar o modificar información previa provista por el fabricante del instrumento, por lo que este documento debe compilar un conjunto de datos básico y completo que describen funcionalmente al instrumento. Este documento representa el entregable de esta etapa.

5.3.3 Calibración espectral

En el caso de cámaras hiperespectrales, esta tarea es de gran importancia si se quiere aprovechar al máximo las ventajas de la utilización del instrumento y la información que genera. La posibilidad de reconstruir un espectro de radiancia espectral de la escena capturada recae en comprender detalladamente la respuesta espectral del instrumento.

En la *Tabla 5.5* se resumen los aspectos más relevantes de esta etapa. La terminación de esta etapa es necesaria para poder realizar la calibración radiométrica y es importante tener este hecho en cuenta al momento de planificar la secuencia de actividades dentro del proceso de calibración.

Es necesario elaborar especificaciones para la calibración espectral que permitan seleccionar fuentes adecuadas, desarrollar procedimientos para la adquisición de datos, definir métodos para el cálculo de coeficientes de calibración y su precisión. Estas especificaciones deben ser elaboradas por el grupo responsable de la calibración del instrumento y transmitidas al laboratorio donde se realizarán las experiencias de calibración espectral.

Tabla 5.5. Resumen de la etapa de calibración espectral.

Etapa	Calibración espectral
Principales tareas a realizar	Realizar pruebas en laboratorio a fin de asignar un valor de longitud de onda a cada píxel del sensor; determinar el rango espectral efectivo del instrumento; determinar la resolución espectral del instrumento; determinar el número efectivo de bandas o canales espectrales y caracterizar distorsiones introducidas por la óptica del instrumento o por defectos de alineación, como por ejemplo el efecto de <i>smile</i> del instrumento.
Tareas auxiliares	Selección de fuentes de referencia, y verificación de la vigencia de su certificado de calibración. Adecuación del laboratorio. Desarrollo e implementación de sistema de organización y almacenamiento de datos generados durante las pruebas.
Roles involucrados	Grupo de calibración, elabora especificaciones para la calibración espectral, supervisa las experiencias para la adquisición de datos, los procesa y genera coeficientes de calibración espectral. Operadores del laboratorio de calibración y responsables del instrumento, quienes intervienen activamente en las experiencias.
Entregables	Reporte de la calibración espectral. Coeficientes de calibración espectral.

Los métodos utilizados para la calibración espectral fueron descritos en el *Capítulo 4*. El laboratorio de calibración debe contar con fuentes de calibración adecuadas, seleccionadas en base a las características espectrales del instrumento, principalmente el rango espectral del sensor y resolución espectral caracterizada por el fabricante del instrumento. Dependiendo del tipo de estándar a utilizar - lámpara de descarga o monocromador - se debe verificar que el laboratorio cuenta con el certificado de calibración vigente.

Los resultados de esta calibración deben ser reportados en un documento que presente los valores obtenidos junto con sus precisiones, una descripción de las fuentes de calibración utilizadas, así como el método aplicado para el cálculo de los coeficientes de calibración espectral. Este reporte conforma el entregable

principal de esta fase. Los coeficientes de calibración calculados deben ser adecuadamente almacenados de manera de poder usarlos en primera instancia en la etapa de calibración radiométrica y luego, en etapas de operación del instrumento en órbita, para el procesamiento de los datos generados y la elaboración de productos.

5.3.4 Calibración radiométrica

El objetivo de esta etapa del proceso de calibración es contar con la capacidad de transformar los datos en DN generados por el instrumento en datos calibrados expresados en unidades de radiancia espectral, con su correspondiente incerteza, a fin de que la cámara pueda ser considerada un instrumento de medición de dicha magnitud física y de acuerdo a estándares reconocidos. Para poder establecer esta relación es necesario un modelo radiométrico del instrumento, el cual se definió al momento finalizar la caracterización del instrumento. Este modelo es luego validado durante la calibración espectral y radiométrica. A partir de este modelo radiométrico se diseñan las experiencias de adquisición de datos y se selecciona el método de cálculo de los coeficientes de calibración.

Las experiencias requieren fuentes de calibración radiométrica que posean un certificado de calibración vigente. En este sentido, como en el caso de la calibración espectral, es importante realizar un seguimiento de los certificados de calibración de las fuentes, a fin de determinar si pueden ser utilizadas como tal. Esta responsabilidad recae en el propio laboratorio de calibración, quien debe proveer tales certificados.

Las responsabilidades del grupo de calibración en esta etapa incluyen la elaboración de especificaciones con requerimientos para el laboratorio. Estas especificaciones deben incluir rangos dinámicos para la calibración, incertezas, configuraciones y toda otra información que permita diseñar las experiencias y elaborar procedimientos detallados para la obtención de datos.

Los datos a utilizar para la calibración deben ser debidamente almacenados, para que el personal involucrado en la calibración tenga un acceso ordenado a los mismos. Los resultados de la calibración radiométrica deben ser debidamente reportados y estar disponibles para su utilización en etapas operativas del instrumento. Este reporte debe además incluir una definición de los límites de validez de la calibración realizada, en particular en términos de la degradación del instrumento con el tiempo, a fin de evaluar posibles ajustes en órbita de los coeficientes calculados en laboratorio.

Tabla 5.6. Resumen de la etapa de calibración radiométrica.

Etapa	Calibración radiométrica
Principales tareas a realizar	Determinación de la respuesta radiométrica del instrumento, estableciendo relación entre radiancia espectral en el plano de entrada y la respuesta en DN del instrumento. Asignación de unidades físicas a los datos generados por el instrumento.
Tareas auxiliares	Selección de fuente de referencia y verificación de la vigencia de su calibración. Adecuación del laboratorio para las pruebas de calibración. Desarrollo e implementación de sistema de organización y almacenamiento de datos generados durante las pruebas.
Roles involucrados	Grupo de calibración, elabora especificaciones para la calibración radiométrica, supervisa las experiencias para la adquisición de datos, los procesa y genera coeficientes de calibración radiométrica. Operadores del laboratorio de calibración y responsables del instrumento, quienes intervienen activamente en las experiencias.
Entregables	Reporte de la calibración radiométrica. Coeficientes de calibración.

Es recomendable realizar experiencias de validación en laboratorio de la calibración radiométrica, que permitan decidir si se han alcanzado los objetivos propuestos para esta etapa. La calibración radiométrica constituye la última etapa del proceso de calibración de la cámara antes de ser entregada para su integración al satélite. En consecuencia, en esta se resume todo el esfuerzo realizado para la calibración del instrumento, por lo que su evaluación adquiere particular importancia.

5.4 Tareas auxiliares

Las distintas etapas del proceso de calibración requieren de la realización de tareas auxiliares que no constituyen en sí mismas parte de la caracterización

o calibración, pero que son necesarias para el proceso y que como tales, deben ser contempladas al momento de elaborar un plan de calibración. Estas han sido nombradas en secciones anteriores y a continuación se describen las más relevantes:

- Preparación de laboratorios donde se realizarán las pruebas. Esto incluye desarrollo y fabricación de equipo de soporte mecánico y electrónico, desarrollo de software específico para la calibración, acondicionamiento de fuentes y verificación del estado de la calibración de las mismas, elaboración de procedimientos para la adquisición de datos, capacitación del personal involucrado y todo aquello que aporta a la preparación de las experiencias de caracterización y calibración del instrumento.
- Desarrollo de un sistema de almacenamiento y organización de datos crudos generados para la caracterización y calibración del instrumento, que en el caso de cámaras hiperspectrales es un volumen considerable de datos. Esta información debe estar disponible de manera ordenada para que el personal involucrado en el proceso pueda acceder a ella en las distintas etapas del mismo, e incluso una vez finalizado el proceso.
- Desarrollo de un sistema de visualización y evaluación temprana de resultados del proceso de caracterización y calibración, tanto espectral como radiométrica, que permita la generación de resultados preliminares de las pruebas a fin de verificar que estas se están realizando de acuerdo a lo previsto y en concordancia con los requerimientos. Estos resultados preliminares permiten además la detección de problemas o fallas en el instrumento.
- Creación y mantenimiento de un sistema de almacenamiento y organización de la documentación generada durante el proceso, incluyendo plan de calibración, documentos de requerimientos, especificaciones técnicas del instrumento, procedimientos, reportes de resultados entre otros, a fin de realizar un seguimiento del proceso desde etapas tempranas del mismo.
- Ensayos realizados utilizando el equipo de soporte y las fuentes de calibración a fin de detectar errores o fallas antes de la adquisición de los datos definitivos para la calibración. Estos ensayos consisten en la adquisición de subconjuntos de las mediciones a realizar, a fin de poner apunto los procedimientos, identificar otras pruebas que sería conveniente realizar y poner a prueba los sistemas de visualización temprana de resultados mencionados en el punto anterior.

Cabe notar que varias de estas tareas requieren una interacción entre los distintos actores involucrados en el proceso de calibración. Es importante generar

espacios y medios para que estas interacciones ocurran en el contexto del proyecto y a lo largo de todo su desarrollo.

5.5 Organización de las tareas a realizar

Como se mencionara en la *Sección 2.6*, una herramienta útil para la organización de las distintas tareas que deben realizarse en un proyecto satelital es la definición de una WBS. Para considerarse incluida en el proyecto, la calibración en laboratorio de la cámara debe incorporarse a la WBS del proyecto, a su diccionario y los roles involucrados en este proceso deben identificarse en la estructura organizativa del proyecto.

El desarrollo de una WBS específica debe realizarse en el contexto del proyecto y por lo tanto se deriva de las características del mismo. Sin embargo, es posible identificar los paquetes de trabajo a incorporar a esta WBS en base a la estructura propuesta para el proceso de calibración. En la *Figura 5.3* se muestra una propuesta para estos paquetes de trabajo. En esta figura se muestran además los roles responsables de cada uno.

Para el desarrollo de un diccionario de la sección de la WBS correspondiente a la calibración en laboratorio de la cámara se requiere definir las actividades a realizar y los entregables de cada paquete de trabajo. Estas fueron definidas en general en la *Sección 5.3*, aunque deben ser especificadas en detalle para cada proyecto en particular. Se debe adicionalmente establecer las interdependencias entre cada paquete de trabajo. En la propuesta que se presenta en la *Figura 5.3* estas interdependencias no están explícitas, aunque las tareas se muestran en un orden que podría considerarse adecuado para el desarrollo del proceso en su totalidad.

Por ejemplo, se debe tener en cuenta que la etapa de calibración radiométrica requiere haber concluido la calibración espectral, para poder determinar resultados definitivos. Por otro lado, la calibración, tanto espectral como radiométrica, si se realiza a nivel sistema, requiere tener el instrumento integrado. En consecuencia, cualquier caracterización a nivel de componentes debe realizarse y terminarse previamente.

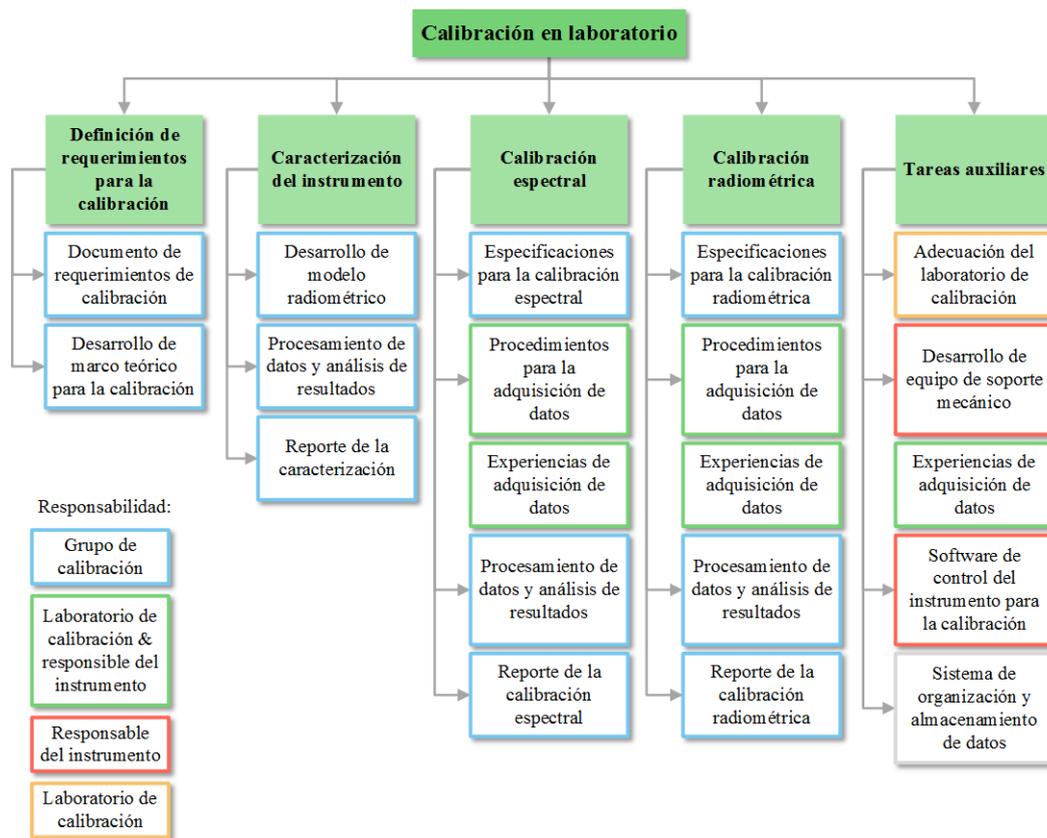


Figura 5.3. Diagrama conceptual que muestra un ejemplo de los paquetes de trabajo a considerar para la calibración en laboratorio de una cámara hiperespectral, indicando a quién corresponde la responsabilidad de cada uno.

5.6 Terminación de cada etapa

La calibración del instrumento se realiza en base a requerimientos que determinan las condiciones y el alcance del proceso. La tarea a su vez, tiene por objetivo verificar requerimientos impuestos sobre el desempeño del instrumento. Luego, al finalizar cada una de las etapas del proceso, es necesario evaluar si las experiencias realizadas han cumplido con los requerimientos de calibración y si los resultados brindan suficiente evidencia de que el instrumento cumple con los requerimientos de desempeño antes mencionados.

Entonces, para poder dar por terminada una etapa es necesario establecer criterios para decidir si esta ha sido realizada con éxito. En caso contrario, se debe decidir las acciones a seguir, entre las cuales pueden incluirse aceptar el incumplimiento de algún requerimiento como una desviación, realizar nuevamente la verificación, o si la falla fuera lo suficientemente importante, considerar modi-

ficar el diseño del instrumento.

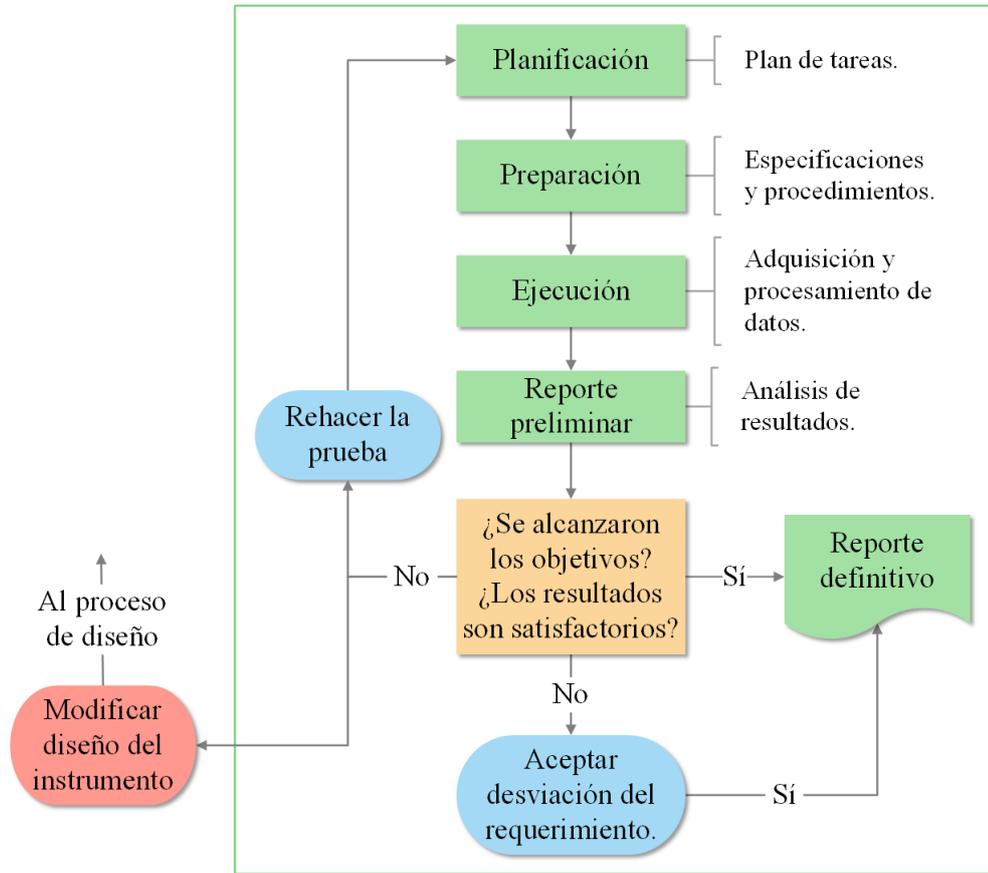


Figura 5.4. Diagrama que describe el desarrollo y la terminación de una etapa o un conjunto de pruebas dentro de una etapa.

En cualquier caso, son necesarias la revisión y aprobación por parte de la gerencia del proyecto para adoptar alguna medida. Se debe tener en cuenta que cualquier medida que se adopte afectará el cronograma y los costos del proyecto o bien el desempeño del instrumento y los datos que generará durante las operaciones en órbita. Es necesario realizar un estudio de compromisos para poder tomar una decisión. Aquí el grupo de calibración actúa como asesor, pudiendo evaluar las posibles implicancias del incumplimiento del requerimiento y el riesgo que esto implica al desarrollo de la misión.

5.7 Reportes de actividades y resultados

El proceso de calibración debe ser documentado en su totalidad. Para esto, es necesario llevar un registro continuo de las actividades realizadas y sus resulta-

dos. Al finalizar cada una de las etapas del proceso de calibración se debe generar un reporte con los resultados de dicha etapa. Estos reportes son entregables del proceso y deben reflejar las actividades realizadas. Los contenidos mínimos de estos reportes que se proponen son:

- objetivos y alcance de las actividades realizadas;
- descripción de las pruebas realizadas, configuraciones y condiciones de medición. Referencia al procedimiento aplicado;
- descripción de las fuentes utilizadas, indicando vigencia de sus certificados de calibración o aclarando si se trata de un estándar intrínseco;
- descripción de datos generados e identificación de los mismos dentro del sistema de almacenamiento de datos de calibración;
- descripción de métodos aplicados y valores obtenidos para los parámetros caracterizados y los coeficientes de calibración, ya sea espectral o radiométrica;
- análisis de resultados obtenidos, evaluación de límites de validez y análisis de incertezas;
- procedimientos *as-run*, es decir, procedimientos tal cual fueron implementados, incluyendo desviaciones.

Al finalizar el proceso de calibración, se debe elaborar un reporte final de la calibración, que contenga la información sobre el instrumento para su utilización en fases posteriores del proyecto (ver *Figura 5.5*). En particular, debe contener referencias a los resultados que serán necesarios durante la fase operativa, en la cual el instrumento genera datos que deben ser interpretados para la elaboración de productos. Esta información debe estar compilada de manera ordenada, para poder acceder a ella fácilmente. Debe ser coherente y no presentar contradicciones ni ambigüedades, adoptando una nomenclatura clara y única.

En la *Figura 5.5* se muestra un diagrama que resume las etapas del proceso de calibración. En este se indica la información más relevante que cada etapa necesita para su planificación y preparación. También se muestran los resultados más importantes de cada una, que en conjunto suman al reporte final de la calibración.

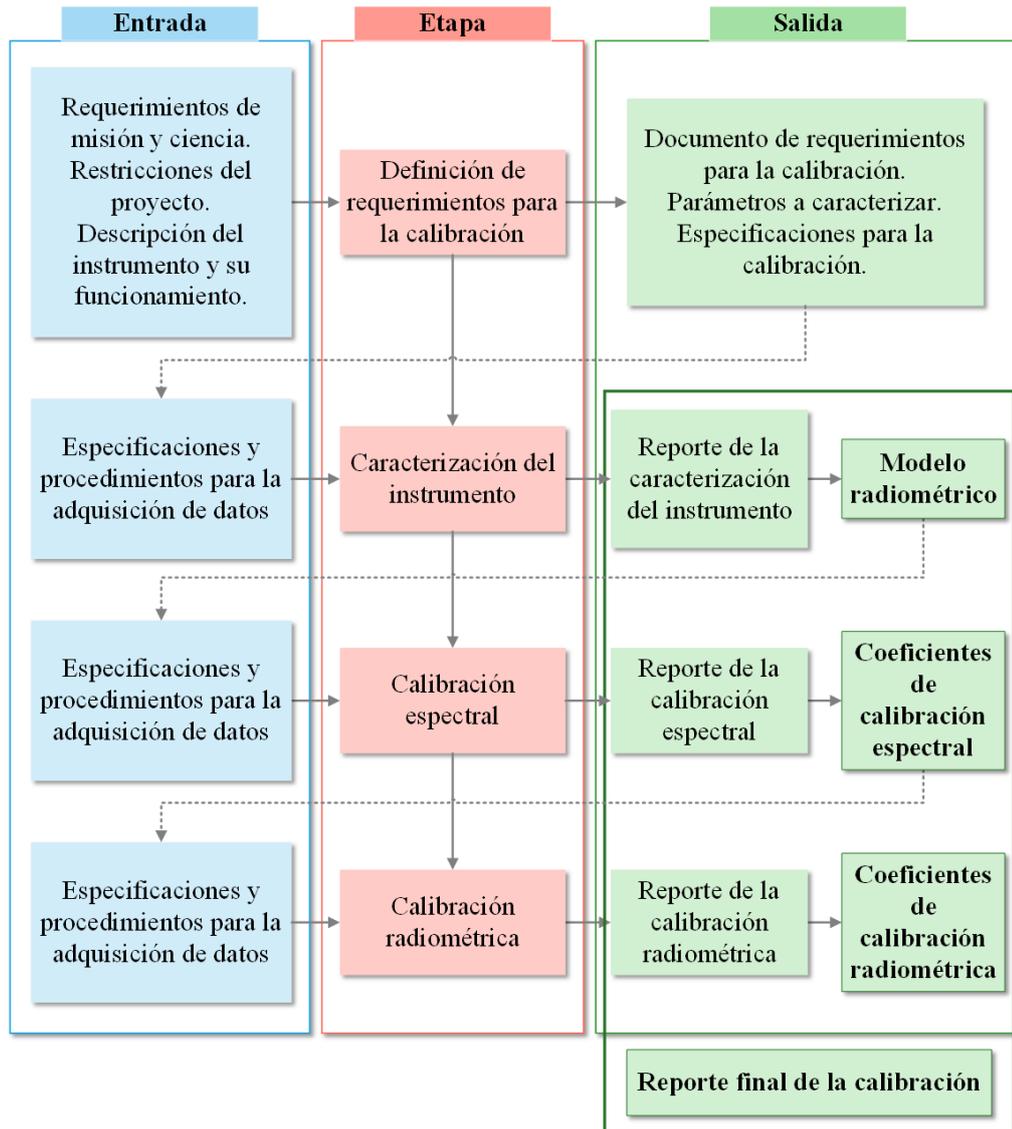


Figura 5.5. Diagrama que muestra las etapas del proceso de calibración de una cámara hiperespectral propuestas en el presente trabajo.

5.8 Lecciones aprendidas

Al finalizar el proceso de calibración es necesario realizar una evaluación integral del mismo, a fin de elaborar un conjunto de lecciones aprendidas. Estas lecciones incluyen la descripción de dificultades que aparecieron durante el proceso y las acciones que se tomaron para resolver el problema o mitigar sus efectos. Estas lecciones no deben solamente reportarse, sino que es conveniente realizar un análisis crítico de las mismas a fin de extraer información útil.

Estas lecciones aprendidas permiten ampliar la base de conocimiento desde la cual se partió para el abordaje de la calibración, a fin de que futuras experiencias de calibración de este tipo de instrumentos puedan beneficiarse de lo aprendido. Estas lecciones aprendidas sirven, en particular, para refinar el proceso de elaboración de requerimientos de calibración, la estimación de tiempos, la identificación de riesgos y la planificación del proceso en general.

La responsabilidad de la elaboración de este conjunto de lecciones aprendidas recae principalmente sobre el grupo de calibración. Sin embargo, estas deben ser sometidas a consideración de los otros actores involucrados en el proceso. Tanto el responsable del instrumento como el laboratorio de calibración pueden, desde su experiencia, aportar información y conclusiones sobre el proceso útiles y beneficiosas.

5.9 Cronograma y evaluación del progreso de la calibración

La distribución de tiempos para la caracterización y calibración de una cámara hiperespectral es altamente dependiente de las características del instrumento, del uso y la aplicación del mismo, de los requerimientos de misión, ciencia y desempeño del instrumento y de la disponibilidad de instalaciones adaptadas para la realización de las pruebas. Por lo tanto, es necesario desarrollar un cronograma específico para cada caso de calibración.

Dado que la calibración en laboratorio del instrumento se realiza luego de que este ha sido fabricado e integrado, pero antes de ser integrado al vehículo, pueden existir presiones para acortar tiempos (y costos). La elaboración de un cronograma detallado y preciso, ajustado al plan de calibración, ofrece una base creíble para justificar los tiempos asignados a cada tarea y estimar el impacto de la reducción de estos tiempos en la confiabilidad de la calibración.

El cronograma del proceso de calibración debe entonces contemplar todas las etapas antes descritas, listando las pruebas a realizar, junto con la duración y márgenes asignados a cada una. A la realización de las experiencias en sí mismas se deben agregar los tiempos necesarios para la elaboración de especificaciones y procedimientos para la adquisición de datos, la realización de las tareas auxiliares correspondientes. Cuanto más detallado sea este listado, más sencillas serán la gestión y la evaluación del progreso de la calibración.

Es necesario establecer en el cronograma instancias de evaluación del progreso de la calibración para cada etapa anteriormente definida. Estas instancias

de decisión deben ser contempladas desde etapas tempranas del proyecto, planteando sus objetivos y alcance, así como criterios de pasa/no pasa. En estas instancias se debe realizar una revisión del estado de avance de cada etapa y de los resultados obtenidos, contrastando con los objetivos y el alcance propuesto para cada una. Como resultado de estas evaluaciones se decide continuar con la siguiente etapa, rehacer o profundizar alguna de las tareas de la etapa actual o incluso se puede concluir que es necesario rehacer experiencias de etapas anteriores.

5.10 Plan de calibración en laboratorio

A fin de disponer de una planificación del proceso de calibración desde etapas tempranas del proyecto, se plantea la necesidad de elaborar inicialmente un plan de calibración preliminar. El objetivo de este plan es identificar requerimientos de proyecto, misión y ciencia a fin de establecer requerimientos para instrumento y realizar una descripción inicial de la cámara para poder determinar los parámetros de desempeño más relevantes a caracterizar. Este plan debe abarcar el tiempo de vida de la misión, realizando estimaciones sobre cronograma y costos, así como identificando riesgos que pueden disminuir la confiabilidad de la calibración. Este plan debe identificar los requerimientos que por su relevancia gobiernan el proceso de calibración. En este plan se debe incluir además una primera aproximación al abordaje que se dará al proceso, identificando modelos radiométricos aplicables para el instrumento en particular.

Este plan preliminar debe ser elaborado en conjunto entre el proyecto, el grupo que será responsable de la calibración, con aportes del grupo responsable del diseño y fabricación del instrumento y del responsable del laboratorio donde se realizará la adquisición de datos para la calibración. Este plan, permite la definición inicial del abordaje de la calibración del instrumento, delimitar las pruebas que se deben realizar y dar un presupuesto inicial de incertezas, a fin de determinar si es factible la realización de la calibración de la cámara en el contexto del proyecto. Este plan debe:

- identificar requerimientos de misión y ciencia que determinan requerimientos para la calibración;
- identificar posibles modelos radiométricos para el instrumento;
- describir el abordaje de la calibración y definición de caracterizaciones o calibraciones a nivel componente que fueran necesarias;

- identificar pruebas a realizar para cuantificar parámetros de desempeño del instrumento y la verificación de requerimientos y fases de la misión en que se realizarán. Describir de manera preliminar las mediciones a realizar;
- identificar roles y definir responsabilidades para cada uno;
- presentar un presupuesto preliminar de incertezas;
- presentar un cronograma preliminar de actividades y estimaciones de recursos humanos necesarios;
- identificar requerimientos preliminares para el fabricante del instrumento, las instalaciones donde se realizarán las mediciones para la calibración, requerimientos de equipos de soporte y desarrollo de software específico;
- identificar fuentes necesarias para la calibración y verificar disponibilidad y vigencia del certificado de calibración de las mismas o especificar un plan para realizar la calibración de las fuentes;
- identificar los factores que pueden afectar la calidad y confiabilidad de los resultados de la calibración;
- estimar de manera preliminar (ROM) los costos del proceso de calibración.

A continuación, y a medida que el proyecto madura, es necesario elaborar un plan de calibración más exhaustivo, a partir del plan preliminar. Este plan más detallado debe ser generado antes de comenzar con las pruebas de caracterización del instrumento y debe contar con el acuerdo de todas las partes involucradas en el proceso. Este plan refina los contenidos del plan preliminar, brindando más detalles sobre la información del plan preliminar. Debe contener información y definiciones sobre:

- parámetros de desempeño del instrumento que se requiere caracterizar;
- requerimientos de misión, de ciencia y ambientales que definen requerimientos de calibración, configuraciones y condiciones en que deben ser obtenidos los datos;
- procedimientos para la adquisición de datos para la calibración, a fin de asegurar que estos datos son adecuados para la calibración;
- cronograma de actividades;
- requerimientos de personal;
- descripción detallada del flujo de datos de calibración, desde el instrumento hasta el personal involucrado en el proceso. Esto implica un diseño detallado del sistema de almacenamiento y organización de datos de calibración;

- descripción de fuentes, validez de sus certificados de calibración y alternativas en caso de que estos certificados pierdan su validez durante el proceso de calibración;
- definición de análisis preliminares a ser realizados sobre los datos recién obtenidos, para evaluar progreso de las mediciones.
- identificación de situaciones y condiciones que resultan un riesgo para la confiabilidad del proceso de calibración y estrategias para su manejo;
- descripción de objetivos y alcance de cada etapa del proceso de calibración, así como criterios de éxito;
- identificación de reportes a generar y sus contenidos mínimos;
- creación de un documento de registro de actividades realizadas, el cual debe ser actualizado a lo largo del proceso.

Este plan definitivo es elaborado por el grupo de calibración, interactuando con el laboratorio de calibración y el grupo responsable del instrumento, que serán quienes implementen la calibración. El plan debe ser documentado aprobado por la gerencia del proyecto y revisado en instancias de evaluación ya sea del propio proceso de calibración como del proyecto.

Dado que el proceso completo de calibración abarca etapas durante las cuales se realizan tareas específicas, puede ser conveniente realizar un plan específico para cada una. Estos planes reducidos se elaboran a partir del plan general y permiten facilitar la realización de cada etapa. Están principalmente orientados a la organización de una etapa o conjunto de experiencias específicas por lo que puede contener mayor grado de detalle de las mismas.

6

Un caso de calibración radiométrica

En este capítulo se presenta la calibración radiométrica de una cámara hiperespectral capaz de adquirir información en la porción visible e infrarroja cercana (VNIR) del espectro electromagnético. Este proceso se presenta como un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta en el capítulo anterior, adaptada a las condiciones específicas del caso. En este sentido, se describe el contexto que origina la calibración de la cámara hiperespectral, a fin de poder definir requerimientos específicos para dicha tarea.

La calibración de la cámara VNIR se realizó en el Laboratorio de óptica de la Unidad de Formación Superior de CONAE. Este Laboratorio cuenta con una esfera integradora como fuente de calibración radiométrica, la cual debió ser previamente caracterizada para utilizarla como referencia. La calibración espectral se realizó mediante el uso de una lámpara de descarga de HgAr de baja presión.

La calibración de esta cámara surge como parte de las actividades de la Unidad de Desarrollo, en el marco de la Maestría en Tecnología Satelital. Los resultados que se presentan se elaboran a partir de experiencias realizadas por la tesista en conjunto con Leandro Rocco, estudiante de la Maestría en Instrumentos Satelitales de CONAE.

6.1 Descripción del instrumento a calibrar

El instrumento a calibrar consiste en una cámara hiperespectral capaz de detectar radiación entre 400 nm y 1000 nm. En la *Figura 6.1* se observa un esquema de los elementos que componen este instrumento. En la *Tabla 6.1* se

listan algunas de sus características más relevantes.

La luz que entra en el instrumento desde una ubicación remota, se enfoca mediante una lente objetivo sobre una rendija de entrada. Esta rendija es una superficie opaca que bloquea toda la luz excepto un área rectangular. La imagen de esta superficie se proyecta, una vez que atravesó el espectrógrafo, sobre la matriz de detectores que conforma el sensor, en el cual se produce una imagen lineal de la porción de la escena que pasa a través de la rendija.

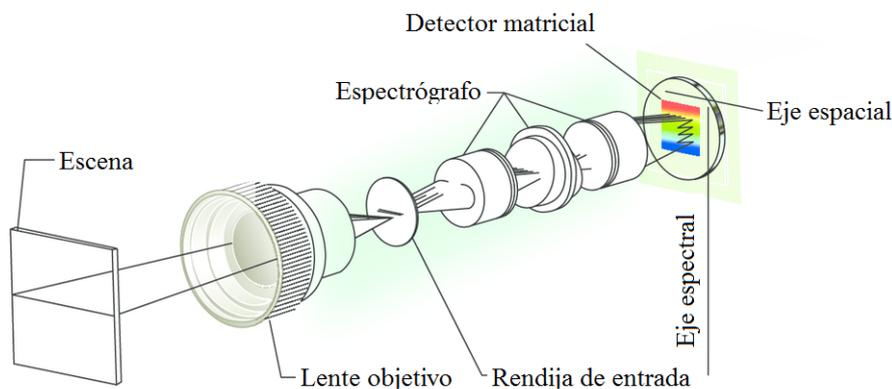


Figura 6.1. Esquema de los elementos que componen el instrumento a calibrar (imagen adaptada de [76]).

El espectrógrafo es un sistema óptico que contiene, entre otros elementos, una red de difracción transmisiva que se encarga de separar espacialmente las componentes espectrales del haz que ingresa al mismo, en la dirección perpendicular a la rendija de entrada. De esta manera, en cada columna del sensor se conforma un espectro correspondiente a una porción de la escena, determinada principalmente por el tamaño del píxel, las características ópticas de la lente objetivo y la distancia entre el instrumento y la escena capturada.

La orientación de la rendija de entrada coincide con el eje espacial que queda determinado en el sensor. En la dirección perpendicular a este eje se conforma la dimensión espectral. En esta se constituyen un gran número de bandas o canales espectrales contiguos, ya que en cada fila de píxeles incide de manera continua radiación de un rango de longitudes de onda acotado. La calibración espectral permite conocer esta respuesta en longitud de onda del detector.

La cámara consta de un sensor CCD de 1214×1648 píxeles (modo extendido), que convierten la energía incidente en un voltaje. En la *Figura 6.2* se muestra la eficiencia cuántica del sensor, que representa la relación entre fotones incidentes y electrones generados por el detector. Se puede observar que esta

conversión es más eficiente para radiación incidente con longitud de onda entre 400 nm y 600 nm, y que esta eficiencia disminuye considerablemente hacia los 1000 nm.

Tabla 6.1. Características de la cámara según hoja de datos del fabricante [77].

Parámetro	Valor
Sensor	
Modelo	KAI-2001 [78]
Tipo	CCD (matricial)
Formato	1200 <i>times</i> 1600 píxeles (activos)
Tamaño de la zona activa	8.88 mm (V), 11.84 mm (H)
Tamaño del píxel	7.4 μm (V), 7.4 μm (H)
Rango dinámico	4000:1 (72 dB)
Electrónica y control	
Cuantificación	14 bits
Tiempo de integración	500 ns a 49 días
Espectrógrafo	
Modelo	Imspector V10E [79]
Rendija de entrada	30 μm \times 14,2mm
Lente objetivo	
FFOV	37 $^\circ$

El sensor posee una arquitectura que puede apreciarse en la *Figura 6.3*. Las columnas indicadas como *Dummy Pixels* no cumplen ninguna función. Las filas y columnas indicadas como *Columnas Oscuras* son detectores que han sido cubiertos con capas de material semiconductor que impide la llegada de radiación. Estos detectores se conocen como *Dark Pixels* y pueden ser utilizados para estimaciones de corriente oscura.

El sensor cuenta además con filas y columnas de *Buffer Pixels* que separan los píxeles oscuros de los activos, evitando que los electrones generados en la zona activa difundan hacia los píxeles oscuros. Los 1200 \times 1600 píxeles centrales, denominados como activos, son los que efectivamente se utilizan para la generación de una imagen.

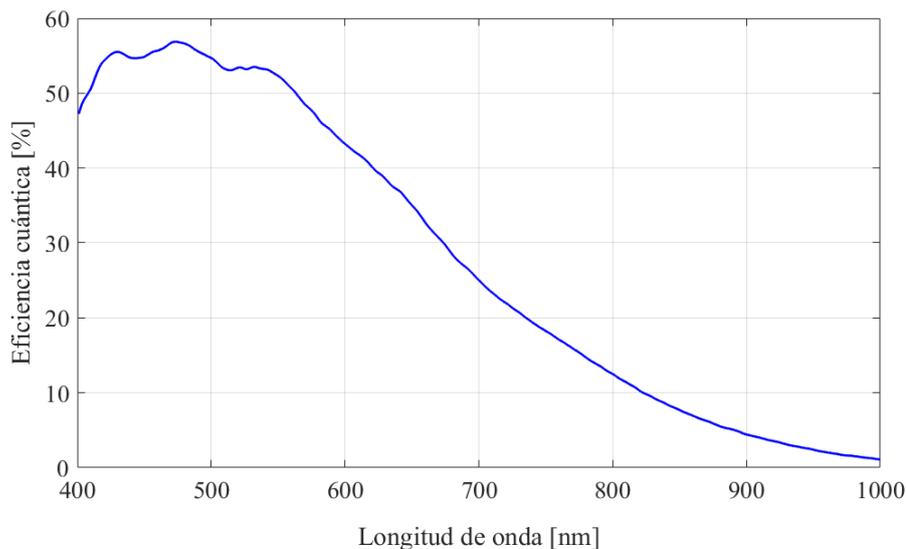


Figura 6.2. Eficiencia cuántica del sensor CCD, de acuerdo al fabricante (adaptado de [78]).

Por cuestiones geométricas de diferencias de tamaño entre la imagen generada por el espectrógrafo y el tamaño del sensor, las filas útiles que se encuentran en condiciones de recibir radiación son sólo un subconjunto de las filas activas totales del sensor. La *Figura 6.4* esquematiza esta situación, mostrando la imagen que el espectrógrafo proyecta sobre el sensor, dejando zonas donde el CCD queda sin iluminar. De las 1200 filas activas, solo reciben efectivamente radiación las filas 185 a 1125. En consecuencia, estas son las filas consideradas para la calibración radiométrica.

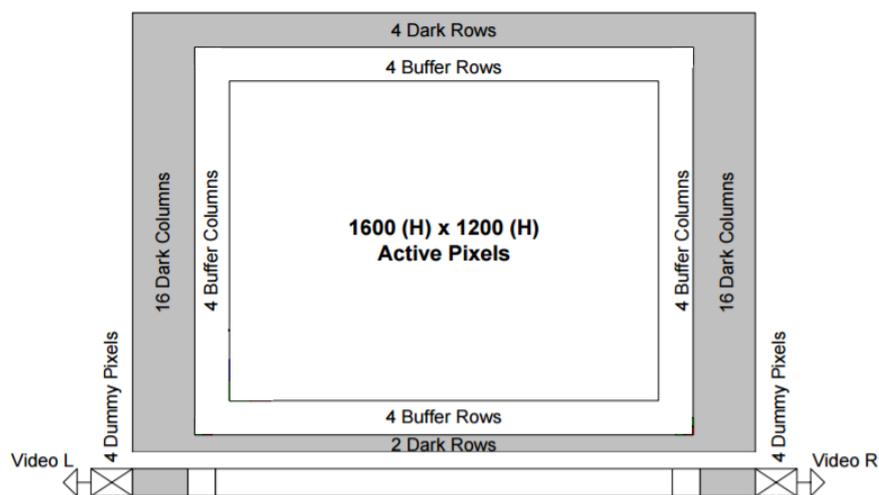


Figura 6.3. Arquitectura del sensor CCD (adaptado de Kodak Kai 2001 Device Performance Specification [78]).

El voltaje producido por cada píxel del sensor es leído por la electrónica de control, la cual se encuentra compuesta por amplificadores, conversores ADC, generadores de señales y demás dispositivos electrónicos necesarios para controlar y configurar el modo de funcionamiento de la cámara y convertir la tensión de salida del CCD en un valor de DN. La cámara puede ser configurada para funcionar con dos frecuencias de reloj de píxel distintas y con uno o dos conversores ADC,

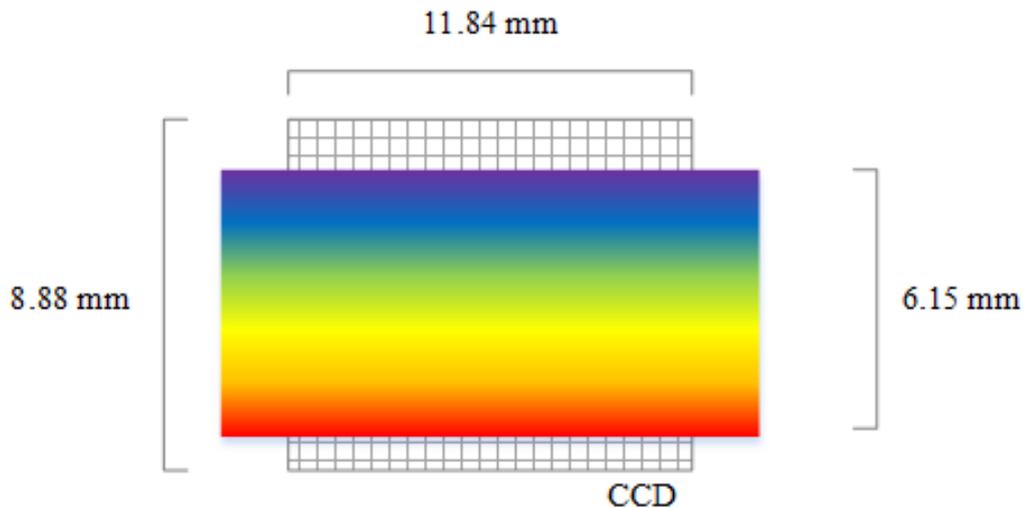


Figura 6.4. Esquema de imagen del espectrógrafo proyectada sobre el sensor CCD, mostrando área del sensor que efectivamente recibe radiación.

El instrumento cuenta además con un *FrameGrabber* que implementa el protocolo de transmisión de datos de alta velocidad CameraLink utilizado para transferir imágenes desde la cámara a la computadora.

Adicionalmente, el instrumento cuenta con un dispositivo controlador que envía los comandos de configuración a la cámara y recibe información sobre su estado. Este dispositivo sirve de interfaz entre el instrumento y la computadora desde la cual se ejecuta el software de control y en la que se almacenan los datos generados por la cámara.

Como resultado de una adquisición, el instrumento entrega una imagen en 2D, en la cual a cada píxel se le asigna un valor en DN que se relaciona a la respuesta de ese píxel con la radiación incidente en el mismo y que puede asociarse con un valor de radiancia espectral en el plano de entrada del instrumento a partir de una adecuada calibración radiométrica.

6.2 Identificación de requerimientos para la calibración

La cámara hiperspectral VNIR forma parte de un sistema de captura de imágenes hiperspectrales aerotransportado, que será utilizado para distintas aplicaciones de observación de la superficie terrestre, sobre territorio argentino. La aplicación específica para la cual será utilizado este sistema se encuentra aún en desarrollo, por lo que los requerimientos tanto de ciencia como de desempeño del sistema no están aún definidos. Sin embargo, es posible plantear un proceso de caracterización y calibración de la cámara VNIR, tanto espectral como radiométrica, intentando abarcar la mayor cantidad de casos posibles de uso de este instrumento.

En esta sección se describe el análisis realizado a fin de establecer un conjunto de requerimientos para la calibración radiométrica de la cámara VNIR, en términos de rango espectral, rango dinámico y tiempos de integración.

6.2.1 Rango espectral

En el caso del rango espectral en el cual se realizó la calibración, se buscó abarcar el espectro completo al cual es sensible el sensor, es decir 400 nm a 1000 nm, verificando que las fuentes utilizadas para la calibración cubrieran este rango.

6.2.2 Rango dinámico

Al momento de decidir el rango de radiancias espectrales para la calibración radiométrica, se decidió abarcar el rango provisto por la fuente de calibración utilizada, en este caso, la esfera integradora que se encuentra disponible en el Laboratorio de óptica de la UFS en CETT-CONAE. En la *Sección 6.5.1* se encuentra una descripción de esta fuente, así como de las experiencias realizadas para su caracterización.

Para poder contar con algún criterio que permita decidir si los rangos de radiancia espectral abarcados por la fuente de calibración son adecuados para la calibración de la cámara, se consideró la campaña de validación de la calibración del instrumento Hyperion, a bordo del satélite EO-1, realizada en febrero de 2001 en Argentina, utilizando el instrumento AVIRIS [80].

En esta campaña se utilizó como sitio de calibración un lago de sal seco, el Salar de Arizaro en la Cordillera de los Andes, que por su altitud, su clima seco y su paisaje homogéneo resulta apropiado. Como parte de la validación se realizaron mediciones del sitio, abarcando los 7.5 km que posee Hyperion como ancho de pisada.

En la *Figura 6.5* se puede apreciar la curva de radiancia espectral obtenida por AVIRIS para el sitio. En ella se observa que el valor máximo de radiancia espectral obtenido es de aproximadamente $0.3 \text{ Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Este valor, si bien no resulta una descripción completa de los niveles de radiancia espectral que se puede esperar para el territorio argentino en su totalidad, permite evaluar si el rango de radiancia espectral que se abarcará con la fuente de calibración es suficiente.

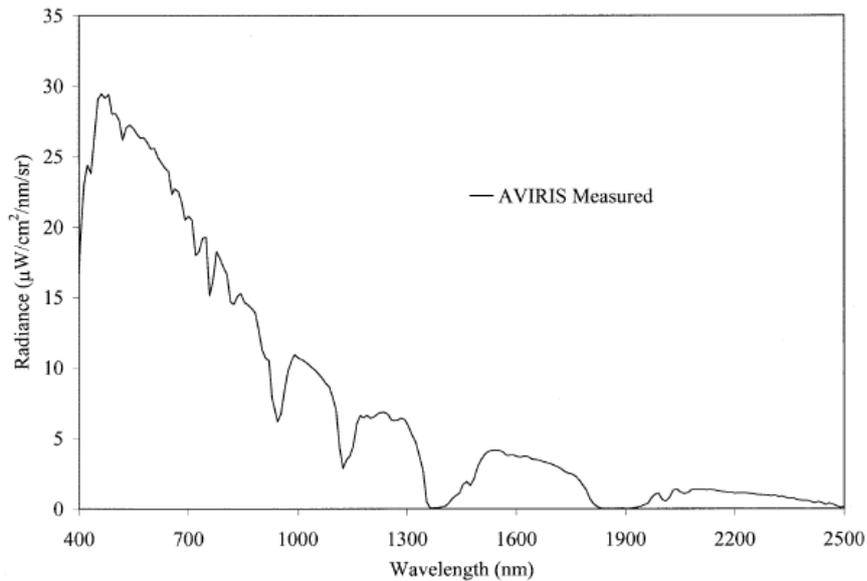


Figura 6.5. Radiancia espectral medida por AVIRIS para el sitio de calibración Salar de Arizaro, Argentina, 7 de febrero de 2001. Promedio de 2000 espectros (extraída de [80]).

6.2.3 Tiempos de integración

En cuanto a los tiempos de integración, se estimaron tiempos de integración teniendo en cuenta las posibles altitudes y las velocidades que tendría el avión preseleccionado para las campañas. Se hicieron consideraciones sobre la calidad de la imagen que se desea generar, teniendo en cuenta que tiempos de integración cortos no permiten suficiente integración de energía por parte del sensor, y que

tiempos de integración largos producen imágenes borrosas.

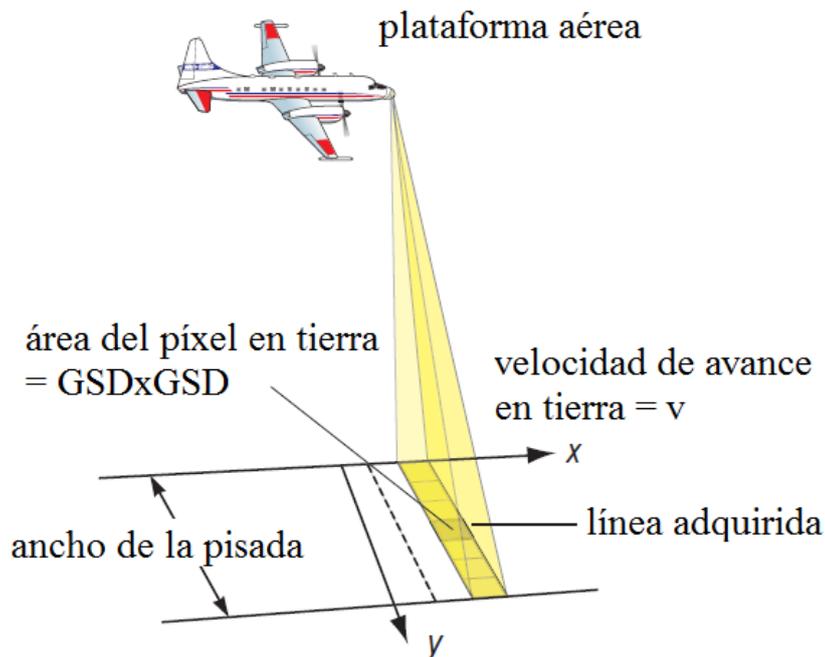


Figura 6.6. Geometría de un sistema de captura de imágenes hiperespectrales *pushbroom* como el del sistema hiperespectral del cual forma parte la cámara VNIR (adaptado de [5]).

Se define tiempo de permanencia o *dwell time* al tiempo necesario para recorrer la extensión de la proyección en tierra de un píxel en la dirección de vuelo [81]. Este tiempo constituye un valor máximo para el tiempo de integración, aunque en general se utilizan tiempos mucho menores, para disminuir el solapamiento entre la adquisición de dos líneas consecutivas.

Este tiempo de permanencia se puede estimar a partir la proyección de un píxel en tierra (GSD), y la velocidad de vuelo en la superficie v como:

$$t_{dwell} = \frac{GSD}{v} \quad (6.1)$$

A fin de estimar este tiempo, es necesario tener información sobre altitud (h) y velocidad de la plataforma en la que irá montado el instrumento (v). A partir de la altitud de vuelo podemos calcular la distancia GSD como:

$$GSD = 2 \times h \times \operatorname{tg}\left(\frac{IFOV}{2}\right) \quad (6.2)$$

donde:

$$IFOV = \frac{FOV}{n_c} \quad (6.3)$$

es el *Instantaneous Field of View* del instrumento y n_c el número de columnas del detector.

En el tiempo en que el instrumento integra información de la escena, la plataforma continúa su movimiento. Esto causa que durante la adquisición se incorpore información a la imagen proveniente de la siguiente línea a adquirir y se deje afuera información sobre el área de interés actual. A fin de minimizar este hecho, se debe seleccionar un tiempo de integración corto en relación a t_{dwell} , pero no tan corto como para que no llegue al detector suficiente energía para generar una imagen de la escena.

En la *Tabla 6.2* se muestran los datos utilizados para la estimación de tiempo de integración de interés para la calibración radiométrica de esta cámara.

Tabla 6.2. Estimación del tiempo de integración para la calibración radiométrica.

Datos del avión	
Altitud h	1000m – 7000m
Velocidad v	62m/s – 72m/s
Datos del sensor	
$IFOV$	$4 \times 10^{-4}rad$
Pisada de un píxel del sensor	
GSD	0,4m a 2,8m
Tiempo de $dwell$	
t_{dwell}	0,006s – 0,05s
Tiempo de integración	
$t_{int} = 0,1 \times t_{dwell}$	0,0006s – 0,005s
$t_{int} = 0,2 \times t_{dwell}$	0,001s – 0,009s

Luego, los requerimientos establecidos para la realización de la calibración radiométrica de la cámara VNIR se resumen como:

- la calibración radiométrica se debe realizar abarcando el rango espectral

máximo disponible para el instrumento, el cuál será determinado durante la caracterización y calibración espectral del instrumento;

- la calibración radiométrica debe abarcar el rango máximo de radiancias espectrales que provee la fuente, el cuál será determinado mediante la caracterización de la misma;
- a modo de ejemplo, se realizará la calibración para un tiempo de integración de 5 ms, de acuerdo a los posibles rangos de tiempos de integración de interés antes establecidos.

6.3 Caracterización del instrumento

Esta sección tiene por objetivo presentar un breve resumen de la caracterización de la cámara hiperespectral VNIR en su estado actual. Esta caracterización fue realizada sobre la base de los fundamentos presentados en la *Sección 4.3* del *Capítulo 4* y representa una etapa del proceso de calibración de acuerdo a la metodología propuesta en el *Capítulo 5*.

En [82, 83] se pueden encontrar más detalles sobre las configuraciones, métodos experimentales y procedimientos empleados para la determinación de los parámetros aquí reportados y otros que permiten tener un conocimiento funcional completo de la cámara VNIR.

6.3.1 Modelo del sensor

El modelo elegido para describir el comportamiento del sensor es el modelo lineal que se muestra en la *Figura 6.7*, donde μ_f es el número medio de fotones que inciden sobre el detector, η_q es la eficiencia cuántica del detector, μ_e es el número medio de electrones generados, μ_d es el número medio de electrones generados por corriente oscura, σ_q es el ruido asociado al proceso de cuantificación, K es la ganancia del sistema y μ_y es el DN medio generado por el detector. Este modelo se plantea para cada uno de los píxeles del sensor y puede representarse por la siguiente ecuación [73]:

$$\mu_y(DN) = K(\mu_e + \mu_d) = K\mu_e + \mu_{dark} \quad (6.4)$$

Realizando consideraciones sobre la eficiencia cuántica del sensor y la re-

lación entre fotoelectrones generados y la radiancia espectral incidente sobre el detector, se puede escribir la señal media generada por el detector como:

$$\mu_y(DN) = \mu_{dark} + K_t t_{int} L_\lambda \quad (6.5)$$

La magnitud $\mu_{dark} = K\mu_d$ se denomina señal oscura, que aquí representa la contribución de electrones generados en ausencia de radiación incidente. La constante K_t depende, entre otras cosas, de la eficiencia cuántica del detector, el área del píxel, la eficiencia del espectrógrafo y la ganancia K del modelo lineal. Esta ecuación fue utilizada para caracterizar la linealidad de la respuesta del sensor con el tiempo de integración y la radiancia espectral incidente.

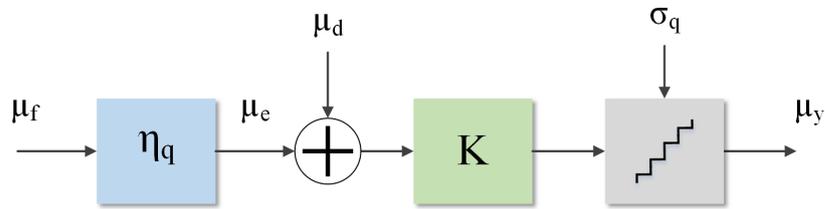


Figura 6.7. Modelo del sensor propuesto para la descripción de su desempeño.

6.3.2 Caracterización de linealidad, ruido y no uniformidades

Se caracterizó la linealidad de la respuesta del sensor con respecto a variaciones del tiempo de integración y la radiancia espectral, aplicando la ecuación (4.5), descrita en el *Capítulo 4*. Esta caracterización se realizó para cada píxel del sensor que se encuentra en la región que efectivamente recibe radiación.

Para esto se realizaron mediciones con la cámara frente a una esfera integradora (cuyas características se presentan en la *Sección 6.5.1*). Para el estudio de la linealidad de la respuesta del sensor respecto de la radiancia espectral se configuró un tiempo de integración de 10 ms, el cual se mantuvo constante durante todas las adquisiciones de imágenes. Luego se varió la radiancia espectral que entrega la esfera integradora encendiendo una a una sus lámparas, de manera de obtener 8 niveles de radiancia distintos. Se capturaron 50 imágenes por cada radiancia, que luego fueron promediadas. A estas imágenes promedio se aplica la ecuación (4.5) píxel a píxel.

En el caso del estudio de la linealidad del sensor con respecto al tiempo de integración, se utilizó la esfera integradora con una lámpara encendida (nivel mínimo de iluminación disponible) y se varió el tiempo de integración de la cámara. Se utilizaron tiempos de integración desde 1 ms a 20 ms a pasos de 1 ms y se capturaron 50 imágenes con cada tiempo. Nuevamente, la ecuación (4.5) se aplicó píxel a píxel sobre la imagen promedio resultante para cada tiempo.

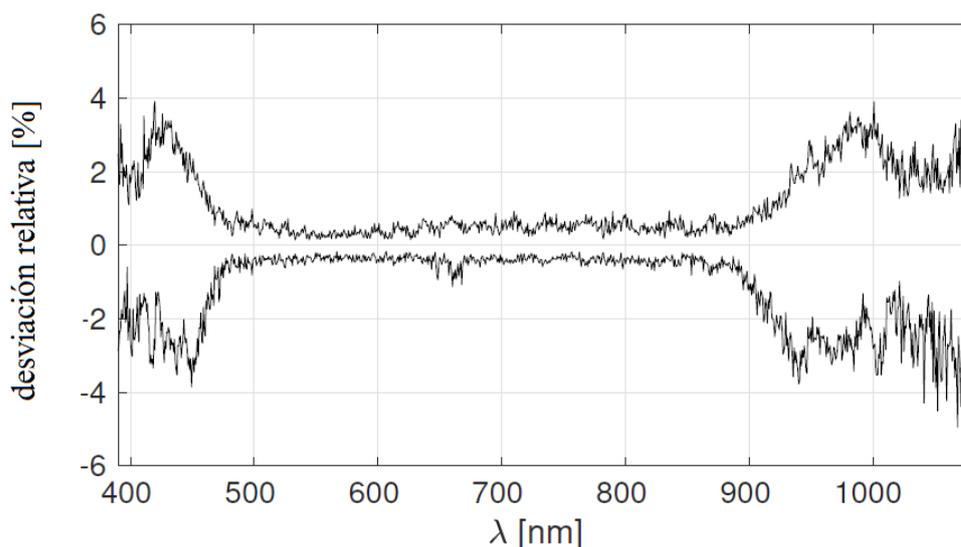


Figura 6.8. Desviación relativa de la linealidad con la radiancia para la columna 800 (extraída de [83]).

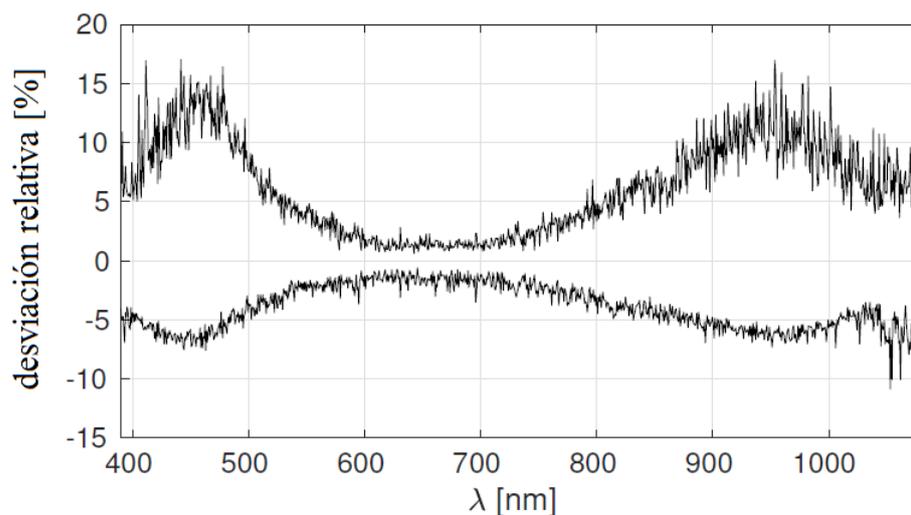


Figura 6.9. Desviación relativa de la linealidad con el tiempo de integración para la columna 800 (extraída de [83]).

Como resultado se obtuvo una no linealidad inferior al 1% entre la filas

que corresponden al rango espectral entre 500 nm y 900 nm, con respecto a variaciones de la radiancia espectral (ver *Figura 6.8*). En las filas extremas la no linealidad alcanzó niveles superiores con respecto a las centrales, para cada columna. De la misma manera, en la *Figura 6.9* se puede apreciar que la desviación del comportamiento lineal con respecto a variaciones del tiempo de integración alcanza niveles superiores.

Sin embargo, esto en principio no significa que en los extremos el sensor posea un comportamiento no lineal con respecto a la radiancia espectral o el tiempo de integración. Esta disminución de la linealidad para filas extremas se atribuye al hecho de que en esas filas la radiancia espectral y los tiempos de integración utilizados generaron niveles de señal significativamente menores en el sensor, como se verá más adelante en la *Sección 6.5.3*, *Figura 6.23*. Esto introduce mayores errores relativos en la caracterización de la linealidad.

Adicionalmente, se caracterizó la señal oscura asociada a la generación de electrones en ausencia de radiación incidente. En este caso se distinguen dos señales de naturaleza diferente: la denominada como Corriente oscura térmica (TDC, *Thermal Dark Current*) y Señal Oscura (DS, *Dark Signal*).

La TDC se refiere a los electrones generados por efecto de la agitación térmica de los átomos del material semiconductor. Esta cantidad varía exponencialmente con la temperatura, de manera que a mayor temperatura, mayor es la cantidad de cargas atrapadas que suman al piso de ruido del sensor CCD.

La DS en cambio es una cantidad que considera todas las cargas no deseadas que quedan atrapadas en los pozos de potencial del material semiconductor en ausencia de radiación incidente, incluida la TDC antes mencionada. Este parámetro es proporcional al tiempo de integración ya que cuanto mayor sea este tiempo, mayor es la cantidad de electrones atrapados en los pozos de potencial. Además, debido a que la DS contiene a la TDC, también presenta una variación exponencial con la temperatura.

Para caracterizar esta señal oscura se adquirieron imágenes con la tapa de la cámara colocada, para impedir cualquier ingreso de luz. Se realizaron 100 adquisiciones para 9 tiempos de integración diferentes. Nuevamente, se utilizaron las imágenes promedio para cada tiempo para la realización del análisis. La temperatura del CCD se ajustó a la predeterminada de -15°C para capturar todas las imágenes. Se pudo determinar que la corriente oscura, para una temperatura de -15°C , incrementa el piso de ruido promedio en un detector en 0.29DN por cada segundo de tiempo de integración [83]. Asimismo, se encontró que para el orden de tiempos de integración en los cuales usualmente una cámara aerotransportada

deberá funcionar en el ambiente operativo, la TDC es despreciable respecto al ruido de lectura, siendo éste último la fuente de ruido principal en el CCD, para esta temperatura de trabajo y rangos de tiempos de integración.

Un resultado importante para el presente trabajo, obtenido de la caracterización del ruido del sensor, es que se pudo mostrar que independientemente del tiempo de integración, la señal generada por el sensor presenta una compensación (*offset*) por señal oscura, es decir, una señal generada en ausencia de radiación incidente, de 100 DN, establecida por diseño del fabricante.

Para determinar la variación de la TDC en función de la temperatura se configuró la cámara para capturar 100 imágenes con un tiempo de integración arbitrario fijo de un segundo y se varió la temperatura del CCD desde -20°C hasta 10°C , en pasos de 1°C . Se pudo observar que en los rangos de temperaturas y tiempos de integración medidos, el piso de ruido se mantiene prácticamente constante y no presenta variaciones significativas con la temperatura o el tiempo de integración. Esto implica que el ruido que tiene más relevancia en esta cámara es el ruido de lectura, siendo el ruido térmico despreciable frente a este.

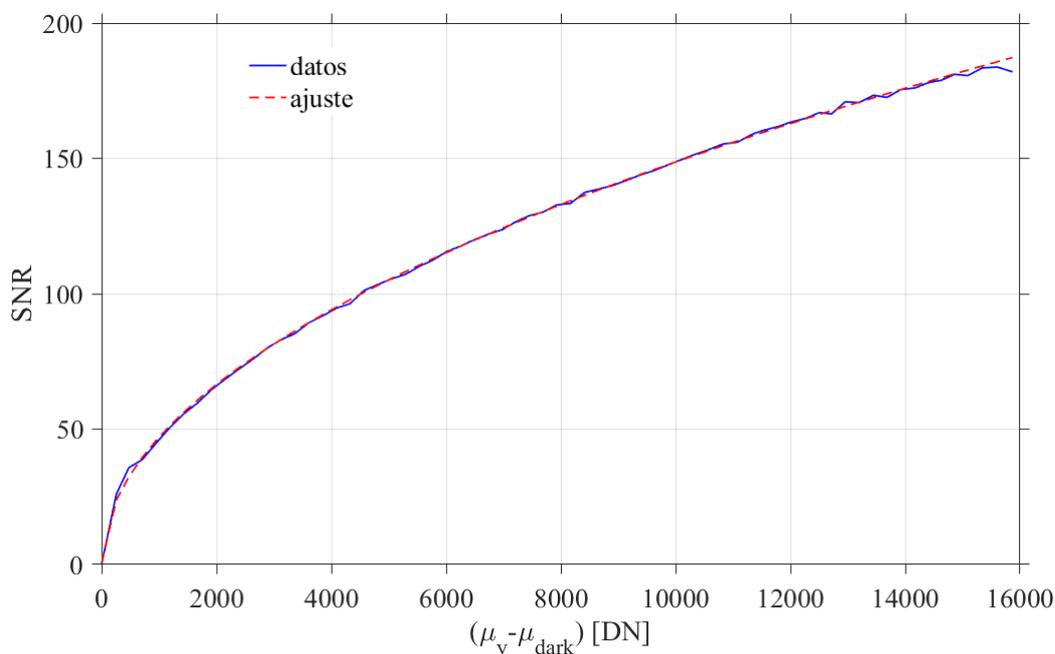


Figura 6.10. SNR del sistema espectrógrafo + sensor CCD, en función del nivel de señal en DN. Se grafica además un ajuste de los datos por una función raíz cuadrada, para mostrar que estos presentan un comportamiento compatible con dicha función.

Otra cantidad caracterizada es la Relación Señal-Ruido (SNR, *Signal to*

Noise Ratio) definida como la relación entre la señal media (sin *offset*) y el ruido generado. Se calculó utilizando la ecuación (4.8) presentada en el *Capítulo 4, Sección 4.3*. Para esto se utilizaron imágenes promedio adquiridas con la cámara frente a la esfera integradora con una sola lámpara encendida, variando el tiempo de integración en los valores 500 ns, 1 ms, 2 ms, 3 ms, ..., 198 ms, 199 ms, 200 ms a fin de obtener diferentes niveles de señal (DN). Estas adquisiciones se realizaron con el sensor CCD a una temperatura de -15°C .

En la *Figura 6.10* se pueden apreciar los valores de SNR obtenidos para la cámara VNIR, para distintos niveles de señal. En el mismo gráfico se incluye el resultado de ajustar una función del tipo $f(x) = \text{sqr}(ax)$ para evidenciar que el comportamiento de los datos es compatible con el de dicha función. Este comportamiento es el esperado para este tipo de sensores [73]. Se puede además observar que la curva alcanza un máximo aproximado de 183 antes que los detectores entren en la región de saturación, que fue determinada en un valor de 15961 DN [83].

Se caracterizaron además píxeles anómalos, identificados como aquellos que exhiben una respuesta que se aparta del comportamiento esperado o medio del sensor. En primer lugar, se capturaron imágenes frente la esfera integradora, para detectar píxeles quemados y se determinó que el sensor no posee píxeles de este tipo. Por otro lado, se identificaron los *hot pixels* del sensor, es decir, píxeles que presentan mayor sensibilidad. Se obtuvo que este tipo de píxeles no presentan un problema, a menos que se utilicen tiempos de integración por encima de 1 segundo.

6.4 Calibración espectral

La calibración espectral realizada al instrumento permitió la asignación de una longitud de onda a cada píxel del sensor, el cálculo de la resolución espectral y la determinación del número efectivo de bandas que pueden distinguirse. Los métodos aplicados fueron presentados en la *Sección 4.4* del *Capítulo 4*. Aquí se muestran las características de las fuentes utilizadas y los resultados obtenidos.

La fuente utilizada para la calibración espectral fue una lámpara de descarga de HgAr de baja presión. Esta fuente posee un número de líneas espectrales de longitud de onda conocida, abarcando el rango espectral del instrumento.

Se adquirieron imágenes con la cámara frente a la lámpara (ver *Figura 6.11*) y se realizó un promedio de estas imágenes para eliminar efectos temporales de

fluctuaciones de la fuente. Para cada curva generada en cada columna (ver *Figura 6.12*) se identificaron los picos a utilizar y a cada uno se le ajustó una curva gaussiana a fin de determinar su centro, como se indicó en el *Capítulo 4, Sección 4.4*. En la *Figura 6.13* se ilustra con un ejemplo este procedimiento.

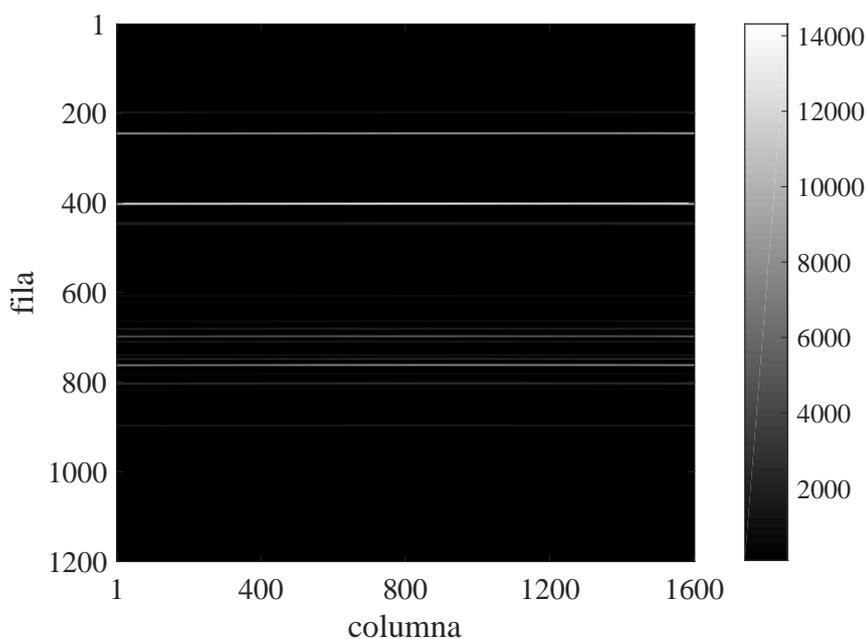


Figura 6.11. Imagen de la lámpara de descarga de HgAr utilizada para la calibración espectral, adquirida por la cámara con $t_{int} = 200ms$. La escala se encuentra en DN.

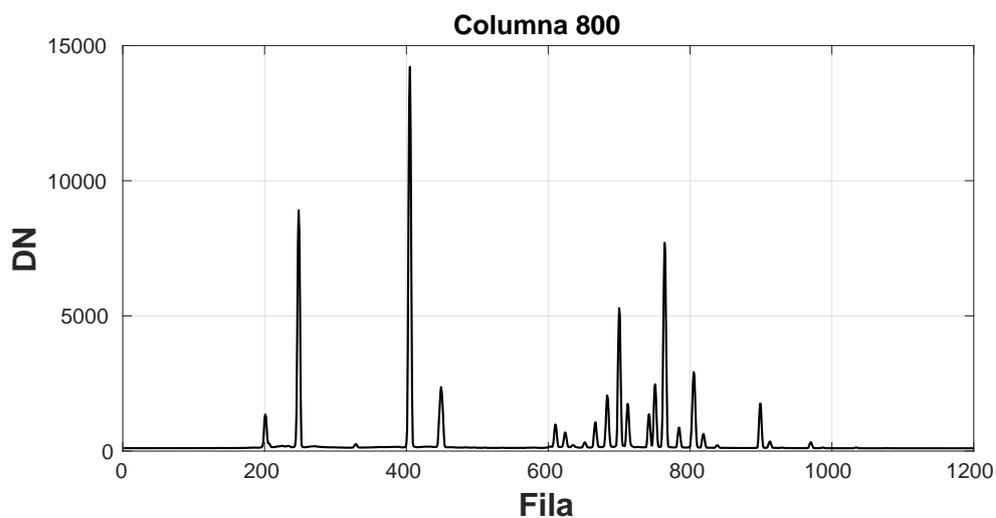


Figura 6.12. Espectro no calibrado de la lámpara de HgAr, adquirido con la cámara VNIR, correspondiente a la columna 800 del sensor.

A cada uno de estos centros se les asignó un valor de longitud de onda, de acuerdo a las líneas del HgAr. Luego, a estos datos se les ajustó un polinomio de grado 3, de manera que para cada una de las 1600 columnas del sensor se obtuvieron 4 coeficientes de ajuste. Estos coeficientes permiten reproducir la respuesta en longitud de onda del sensor para cada una de las filas del mismo. En la *Figura 6.14* se presenta un ejemplo de ajuste polinómico, junto con la ecuación del polinomio resultante.

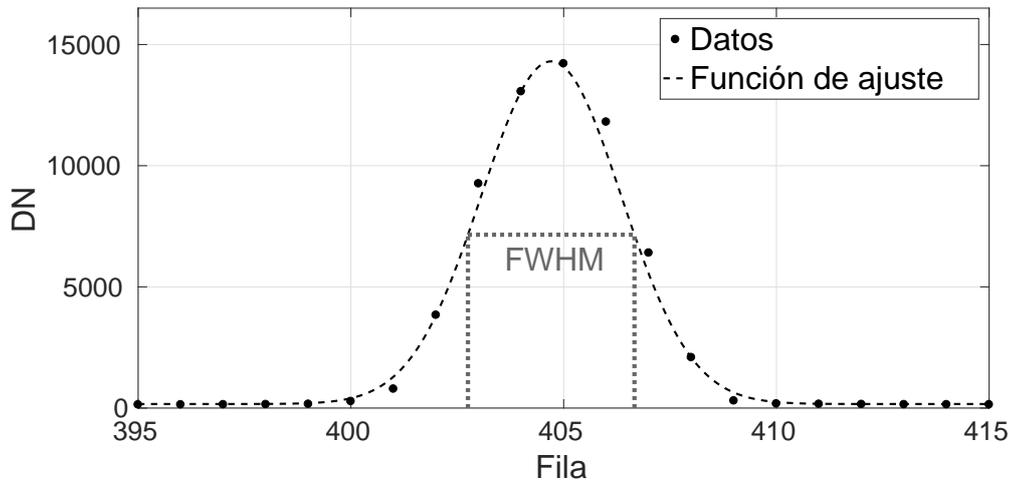


Figura 6.13. Ejemplo de ajuste gaussiano y determinación del centro, para uno de los picos (líneas espectrales) del espectro de la *Figura 6.11*.

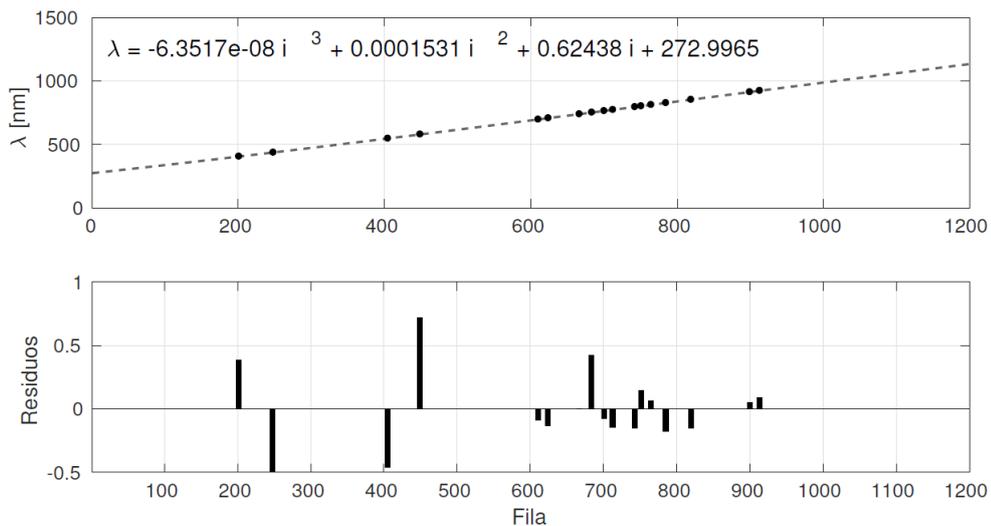


Figura 6.14. Ajuste polinómico y residuos, correspondiente a la columna 800 del sensor (extraído de [83]). Cada uno de los datos graficados corresponde a un pico (línea espectral) identificado de la *Figura 6.12*.

Por otro lado, para la determinación de la resolución espectral, se utilizó como fuente un monocromador, cuya hoja de datos puede encontrarse en [71]. Este fue configurado en distintas longitudes de onda y en cada caso se capturaron imágenes de la salida. Para cada columna del sensor se graficó la curva de DN vs. fila. En esta curva se identificó el pico sobre el cual se ajustó una función gaussiana a la cual se le calculó el FWHM (*Full Width Half Maximum*). Se asignó como resolución espectral esta magnitud, para cada longitud de onda configurada en el monocromador.

A fin de cuantificar la distorsión espectral del sensor, es decir, el corrimiento en longitud de onda en la dimensión espectral (filas) a través de la dimensión espacial (columnas), se graficó la longitud de onda obtenida mediante el polinomio de calibración espectral en función de las columnas del sensor, para un determinado número de fila.

El resultado se puede observar en la *Figura 6.15*. Este gráfico permite cuantificar el fenómeno de *smile*, el cual se debe a una distorsión en la imagen de la rendija de entrada del espectrógrafo sobre el sensor, producida por aberraciones ópticas en el espectrógrafo. En la figura se puede apreciar la variación en longitud de onda calibrada, para cada píxel de la fila.

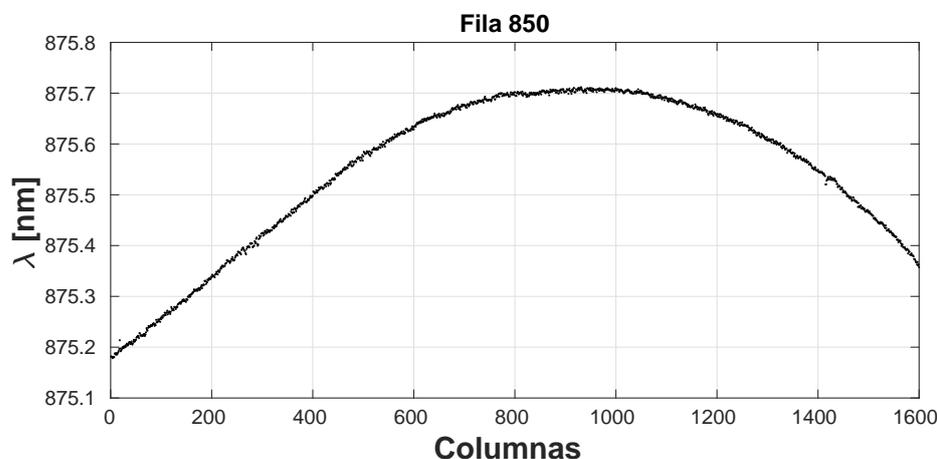


Figura 6.15. *Smile* correspondiente a la fila 850 del sensor.

En resumen, en la *Tabla 6.3* se presentan los resultados más relevantes de esta calibración espectral. El número de bandas efectivas se calculó a partir del rango espectral que queda definido por la calibración espectral en la superficie del sensor que efectivamente recibe radiación y la resolución espectral.

Tabla 6.3. Resultados más relevantes de la calibración espectral.

Parámetro	Valor
Resolución espectral	4.1 nm (mín.)
Cantidad de bandas efectivas	168
Rango espectral	398 nm a 1080 nm
Smile máximo	0.6 nm

6.5 Calibración radiométrica

En esta sección se describen en primera instancia las experiencias realizadas para caracterizar la fuente de referencia utilizada para la calibración radiométrica. Esta consiste en una esfera integradora disponible en el Laboratorio de Óptica de la UFS en CETT-CONAE. Luego se identifica un modelo radiométrico que determina la ecuación de calibración a utilizar. Por último se describe e implementa un método para el cálculo de los coeficientes de calibración.

6.5.1 Caracterización de la fuente de referencia

Para realizar la calibración radiométrica de la cámara hiperespectral es necesario contar con una fuente de iluminación uniforme y de radiancia espectral conocida y calibrada. En este caso, el Laboratorio de óptica de la UFS cuenta con una esfera integradora LabSphere USS-4000 [84]. Esta esfera integradora de 100 cm de diámetro aproximadamente, cuenta con un puerto de salida de 35 cm de diámetro, y ha sido diseñada para brindar una salida de luminancia variable entre 1000 y 10.000 foot-lamberts. La esfera incluye ocho fuentes de luz halógena (originalmente son diez, pero dos se encuentran actualmente inhabilitadas) que pueden encenderse selectivamente para alcanzar ocho niveles de salida distintos.

Para poder utilizar esta esfera integradora como referencia para la calibración radiométrica se realizó una caracterización de la radiancia espectral en el puerto de la esfera. Esta radiancia espectral se midió con el espectroradiómetro FieldSpec 4 Hi-Res [85] en unidades de $Wm^{-2}nm^{-1}sr^{-1}$ y en el rango de longitudes de onda que abarcan los 350 nm a los 2500 nm, con una resolución espectral de 1 nm. Sobre el extremo de la fibra óptica del espectroradiómetro

se colocó un sensor con un FFOV de 8 grados. Este espectroradiómetro es el instrumento de referencia de CONAE para mediciones radiométricas de campo y calibraciones (ver *Figura 6.16*).

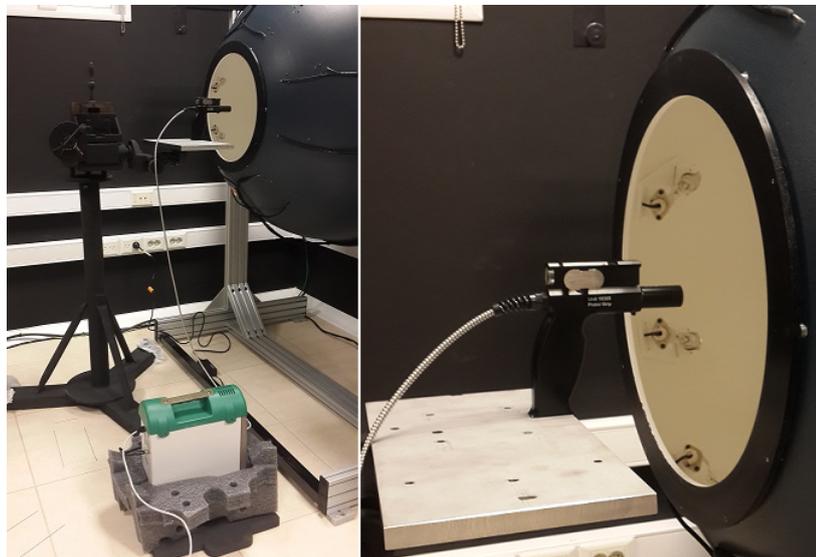


Figura 6.16. Configuración utilizada para la caracterización de la esfera de integración. Se puede observar el espectroradiómetro colocado sobre el soporte frente al puerto de la esfera. En el extremo del espectroradiómetro el adaptador de 8° de FOV.

En la *Figura 6.17* se muestran los perfiles de radiancia espectral medidos, para los distintos niveles de intensidad en el puerto de la esfera, correspondientes al número de lámparas encendidas (1 a 8). Estos perfiles se obtuvieron del promedio de 70 mediciones realizadas con el espectroradiómetro ubicado en el punto central de la boca de la esfera integradora. Estos son los perfiles utilizados como referencia para la calibración radiométrica de la cámara.

Como se puede apreciar en el gráfico, el rango dinámico abarcado depende de la longitud de onda, siendo menor para longitudes de onda bajas. Este rango dinámico corresponde a los valores de radiancia espectral entre la curva correspondiente a una lámpara de la esfera encendida (L_1) y la curva correspondiente a ocho lámparas encendidas (L_8).

Se puede apreciar además que el rango de radiancias espectrales que entrega la esfera integradora contiene ampliamente el del escenario esperado para la cámara, de acuerdo a lo establecido en los requerimientos de calibración presentados en la *Sección 6.2*.

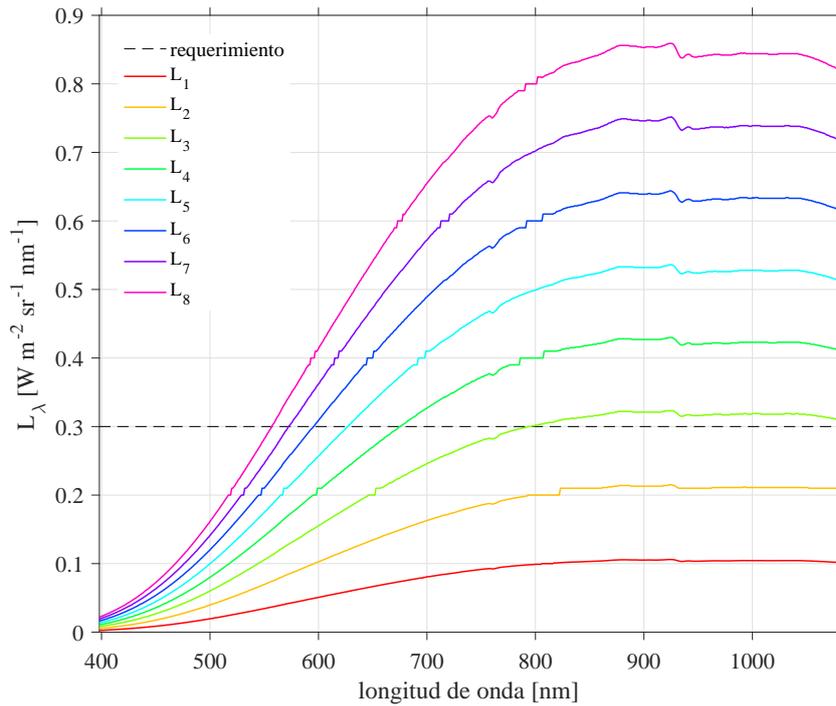


Figura 6.17. Distintos niveles de radiancia espectral de la esfera integradora USS-4000, para 1 a 8 lámparas encendidas. En el gráfico se incluye además el nivel de radiancia espectral máximo esperado de acuerdo a los requerimientos planteados en la *Sección 6.2*

De la misma manera, se caracterizó la uniformidad de la esfera, midiendo con el espectroradiómetro la radiancia espectral en 13 puntos distintos de la superficie del puerto de la esfera (ver *Figura 6.18*), cubriendo un área central de la misma de 6 cm de diámetro aproximadamente (esto corresponde a un 1,4% del área total del puerto de la esfera integradora). El área elegida para caracterizar abarca el área que ocupa la lente de la cámara, aproximadamente $72,4\text{cm}^2$ (el área de la lente corresponde a un 0,9% del puerto de la esfera integradora). En la *Figura 6.18* se observa un esquema que muestra los puntos en los que se midió la radiancia espectral de la esfera integradora, para realizar la caracterización de uniformidad de la misma.

Como medida de la uniformidad de la fuente, se calculó [73]:

$$\Delta L_{\lambda} = \frac{\max(L_{\lambda}) - \min(L_{\lambda})}{\mu_{L_{\lambda}}} \times 100 \quad (6.6)$$

donde $\max(L_{\lambda}) - \min(L_{\lambda})$ es la diferencia entre las radiancias espectrales máximas y mínimas medidas y $\mu_{L_{\lambda}}$ es el promedio de estas radiancias espectrales medidas para los 13 puntos de la grilla de la *Figura 6.18*.

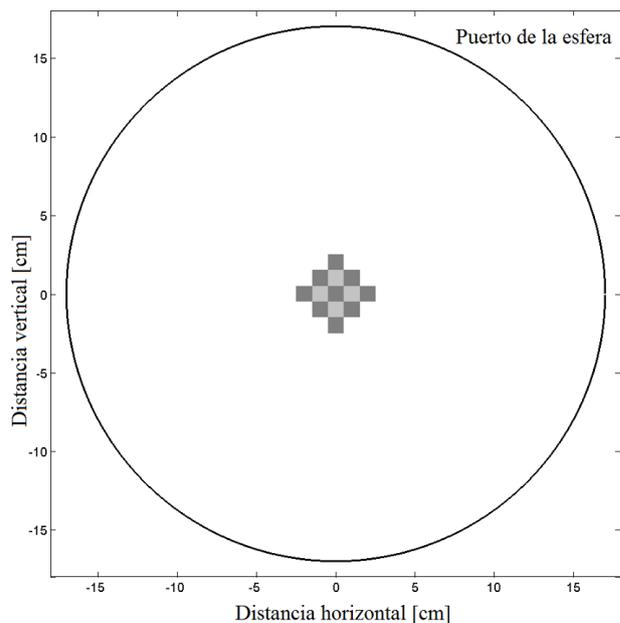


Figura 6.18. Superficie del puerto de la esfera considerada para la caracterización de uniformidad de la fuente de referencia.

En la *Figura 6.19* se pueden apreciar los valores de ΔL_λ calculados para cada uno de los 8 niveles de iluminación de la esfera disponibles. Se puede observar que esta medida de no uniformidad no excede el 1% en el área en que fue calculada y para el rango de longitudes de onda de interés. Se puede observar también que esta medida de uniformidad empeora hacia los extremos del rango espectral considerado.

Por último, se estimó la incerteza con la que se determinó la radiancia espectral para cada uno de los niveles de iluminación considerados. Esta incerteza se calculó a partir de tres fuentes de incerteza presentes en el proceso de medición. En primer lugar, se consideró una incerteza proveniente de la desviación estándar del promedio de las mediciones realizadas con el espectroradiómetro. Se incluyó además un 4% de incerteza relativa propia del instrumento, de acuerdo a lo consignado en el último certificado de calibración del mismo (fuera de vigencia actualmente). Por último, se incorporó una incerteza relativa adicional equivalente a la no uniformidad de la esfera integradora, correspondiente a la medida ΔL_λ para cada nivel de radiancia espectral disponible (*Figura 6.19*).

En la *Figura 6.20* se muestra el valor máximo de esta incerteza relativa. Este se tomó entre los valores correspondientes a los distintos niveles de iluminación considerados y para cada longitud de onda.

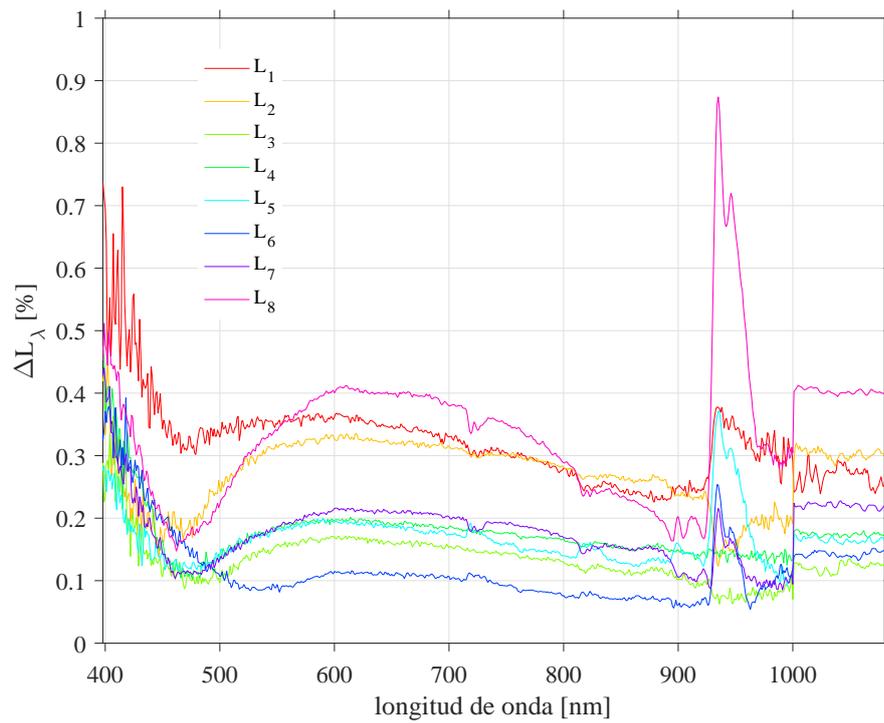


Figura 6.19. Medida de la uniformidad de la esfera integradora US-4000, para cada nivel de radiancias espectrales disponibles (1 a 8 lámparas encendidas).

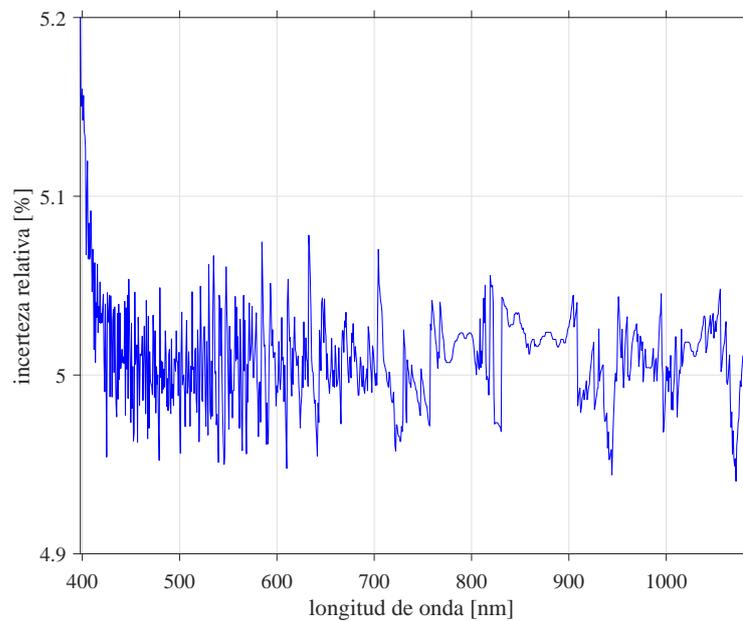


Figura 6.20. Incerteza relativa máxima asociada a la radiancia espectral de la esfera integradora en función de la longitud de onda.

6.5.2 Modelo radiométrico y cálculo de coeficientes

La calibración radiométrica de la cámara VNIR fue abordada a nivel sistema, de manera de establecer una relación entre radiancia espectral en el plano de entrada del instrumento y los datos en DN generados por el mismo, que contemple al instrumento como un todo. El modelo radiométrico adoptado para la calibración es:

$$DN_c(i, j) = D(i, j) + G(i, j)t_{int}L_\lambda(i, j) \quad (6.7)$$

donde t_{int} es el tiempo de integración, $L_\lambda(i, j)$ es la radiancia espectral incidente en el píxel (i, j) y $D(i, j)$ y $G(i, j)$ son los coeficientes de calibración radiométrica.

Este es el modelo más simple que puede plantearse para describir el comportamiento radiométrico de este tipo de instrumentos [1] y supone una respuesta lineal de la señal registrada y digitalizada por el instrumento y la radiancia espectral a la entrada de la lente del instrumento.

Esta ecuación se plantea para cada píxel (i, j) del sensor que recibe radiación (filas 185 a 1125). El subíndice i identifica la fila (1 a 941) y el subíndice j la columna (1 a 1600). Esta ecuación es coherente con el comportamiento lineal observado durante la caracterización del instrumento, presentado en la Sección 6.3.

El método adoptado para el cálculo de los coeficientes $G(i, j)$ y $D(i, j)$ se muestra en la *Figura 6.21*. Partiendo de los datos crudos $DN(i, j)$ generados por la cámara se realiza la corrección por corriente oscura, es decir, se elimina de la señal el ruido asociado a la señal generada en ausencia de radiación. En este caso, se resta la compensación de 100 DN fijada por el fabricante a cada píxel. Luego se asocia a cada píxel una longitud de onda, de acuerdo a la calibración espectral realizada. Esta asignación permite establecer la relación entre el DN del píxel y el valor de radiancia espectral de la fuente. Por último, aplicando la ecuación de calibración (6.7), se obtienen los coeficientes de ganancia $G(i, j)$ y offset $D(i, j)$ para cada píxel considerado del sensor.

Este método asume que la radiancia espectral que ingresa al instrumento es uniforme en toda la superficie de la lente. Como consecuencia de esta suposición, la calibración tiene además el efecto de compensar no uniformidades en la respuesta del sensor a distintos niveles de radiancia espectral.

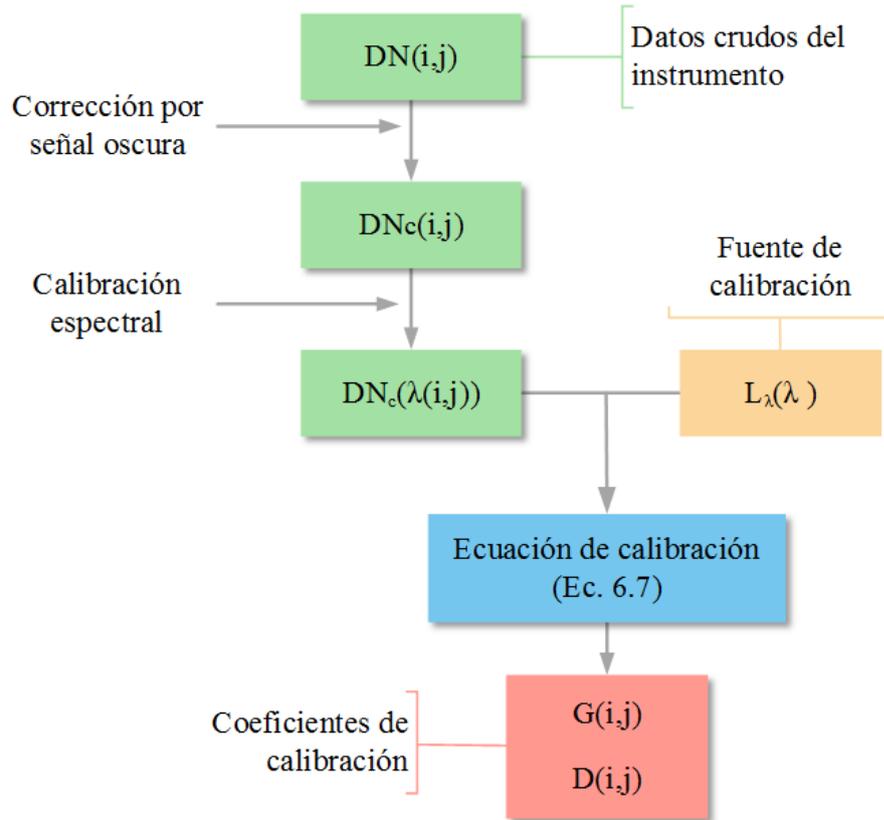


Figura 6.21. Esquema del método propuesto para la calibración radiométrica de la cámara hiperespectral VNIR.

Luego, para cada píxel del sensor se realiza un ajuste lineal por cuadrados mínimos de los datos disponibles, para los distintos niveles de radiancia espectral utilizados para la calibración y las correspondientes imágenes generadas por el instrumento. El cálculo de los coeficientes se realiza para un tiempo de integración fijo.

Una vez realizada la calibración radiométrica y obtenidos los coeficientes de calibración de ganancia $G(i, j)$ y *offset* $D(i, j)$, la radiancia espectral calibrada se obtiene despejando de la ecuación (6.7), de manera que:

$$L_{\lambda}(i, j) = \frac{(DN_c(i, j) - D(i, j))}{G(i, j)} \quad (6.8)$$

donde $DN_c(i, j)$ son los datos en DN generados por la cámara y debidamente corregidos por señal oscura.

La incerteza asociada a esta radiancia espectral calibrada se obtiene mediante propagación de errores. Para esto se deben considerar las incertezas de los coeficientes σ_G y σ_D obtenidas del ajuste lineal por cuadrados mínimos y la incerteza de los datos crudos promedio corregidos σ_{DN} , calculada como la desviación

estándar asociada al promedio de imágenes.

6.5.3 Adquisición de datos

La adquisición de los datos para la calibración radiométrica se realiza con el instrumento ubicado sobre el soporte especialmente fabricado para este fin, con su lente sobre el puerto de la esfera (ver *Figura 6.22*). En esta configuración se capturan 50 imágenes de la señal de la esfera, para un tiempo de integración previamente seleccionado. En este caso se configuró la cámara para adquirir imágenes con $t_{int} = 5ms$. Los resultados que se presentan a continuación corresponden a los coeficientes calculados para este tiempo de integración.

Estas imágenes luego se promedian para compensar posibles fluctuaciones de la fuente y constituyen los datos crudos a utilizar para el cálculo de coeficientes. Este procedimiento se realiza para cada uno de los 8 niveles de iluminación disponibles en la esfera integradora.



Figura 6.22. Configuración utilizada para la adquisición de datos para la calibración radiométrica.

En la *Figura 6.23* se pueden observar los perfiles en DN de los datos generados por el instrumento, para la columna 800 del sensor. Como se puede apreciar, los niveles de señal involucrados en la calibración dependen de la fila (longitud de onda), siendo muchos menores en las filas extremas del sensor, comparados con los valores correspondientes a los píxeles de la zona intermedia de la fila.

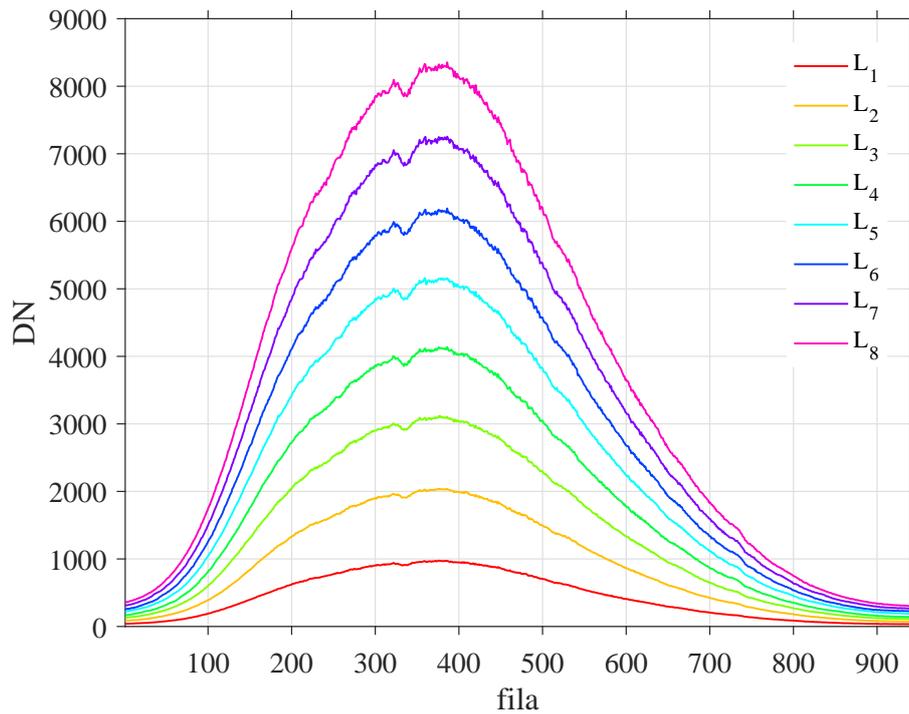


Figura 6.23. Perfiles de los datos en DN, para la columna 800 del sensor y para cada uno de los 8 niveles de iluminación que provee la esfera integradora.

6.5.4 Resultados de la calibración radiométrica

En las *Figuras 6.24* y *6.25* se muestra el coeficiente de ganancia y en las *Figuras 6.26* y *6.27* el coeficiente de *offset*, obtenidos para cada píxel del sensor que pertenece a la superficie del mismo sobre la que efectivamente incide radiación. Los resultados se presentan en dos vistas distintas, que permiten apreciar diferentes detalles de los resultados.

Cabe notar que estos coeficientes resultan válidos para el tiempo de integración con el que se adquirieron las imágenes ($t_{int}=5$ ms) y para el rango de radiancias espectrales que determinan las curvas que se muestran en la *Figura 6.17*. Fuera de estas condiciones de validez, la aplicación de estos coeficientes para la obtención de imágenes calibradas puede introducir errores significativos, como se verá más adelante.

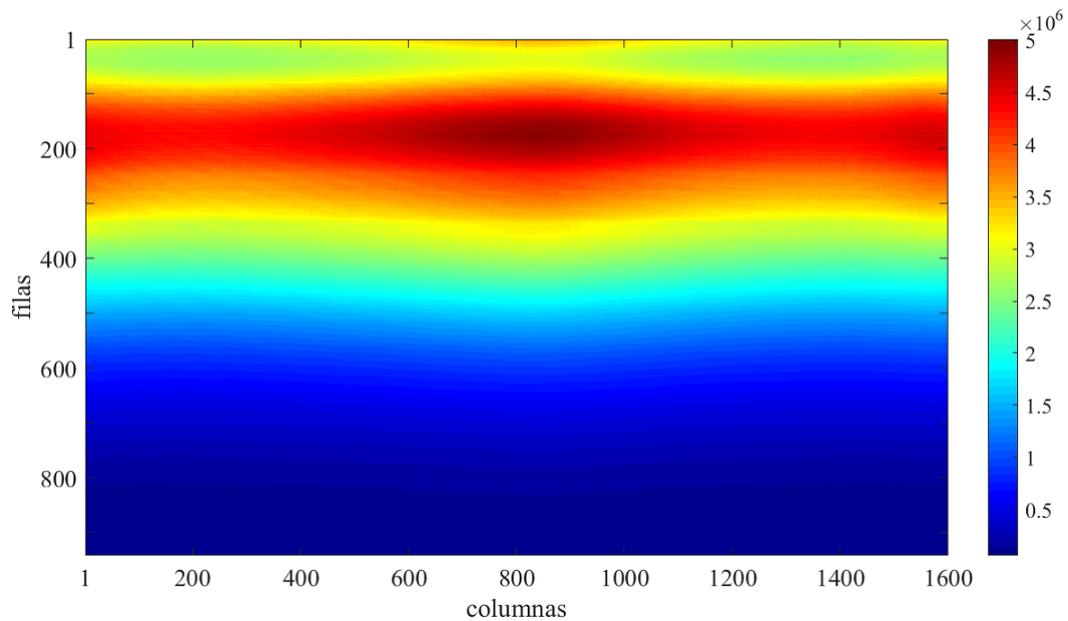


Figura 6.24. Coeficiente de calibración ganancia $G(i, j)$, en $(DN m^2 sr nm W^{-1})$, para cada uno de los 941×1600 píxeles del sensor efectivamente iluminados.

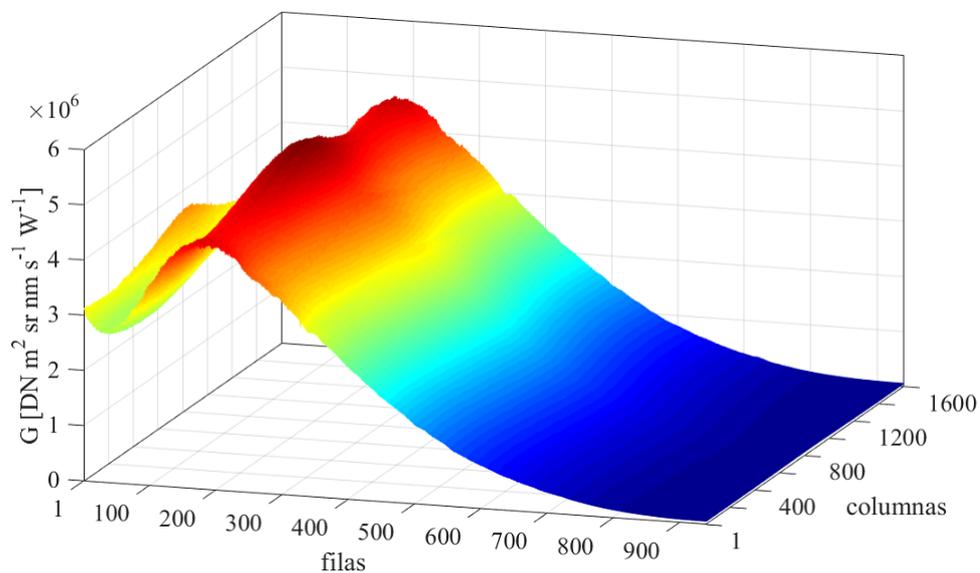


Figura 6.25. Coeficiente de calibración ganancia $G(i, j)$, en $(DN m^2 sr nm W^{-1})$, para cada uno de los 941×1600 píxeles del sensor efectivamente iluminados. Vista en 3D.

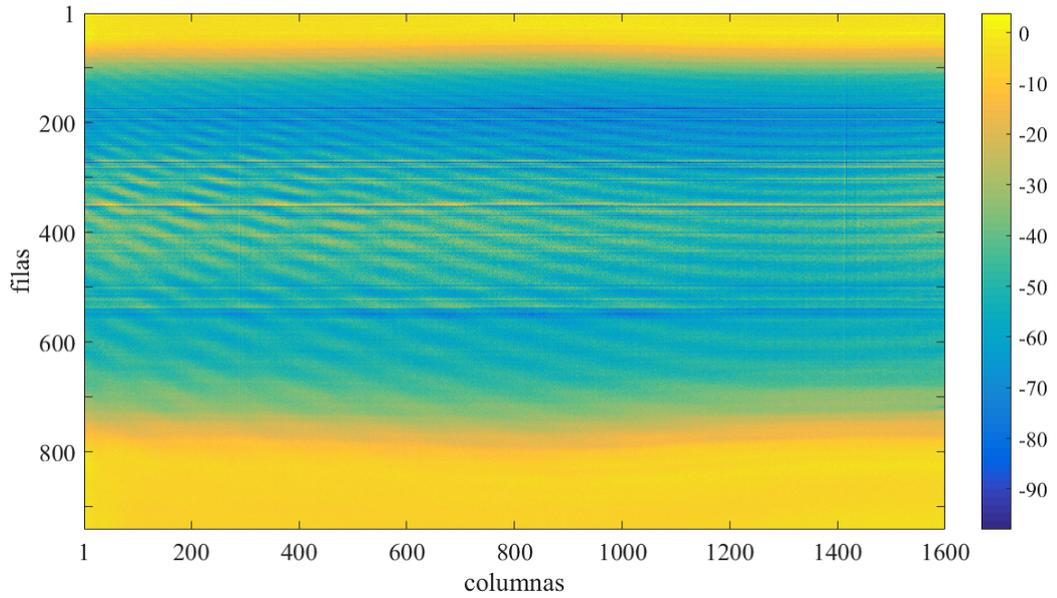


Figura 6.26. Coeficiente de calibración *offset* $D(i, j)$ en DN, para cada uno de los 941×1600 píxeles del sensor efectivamente iluminados.

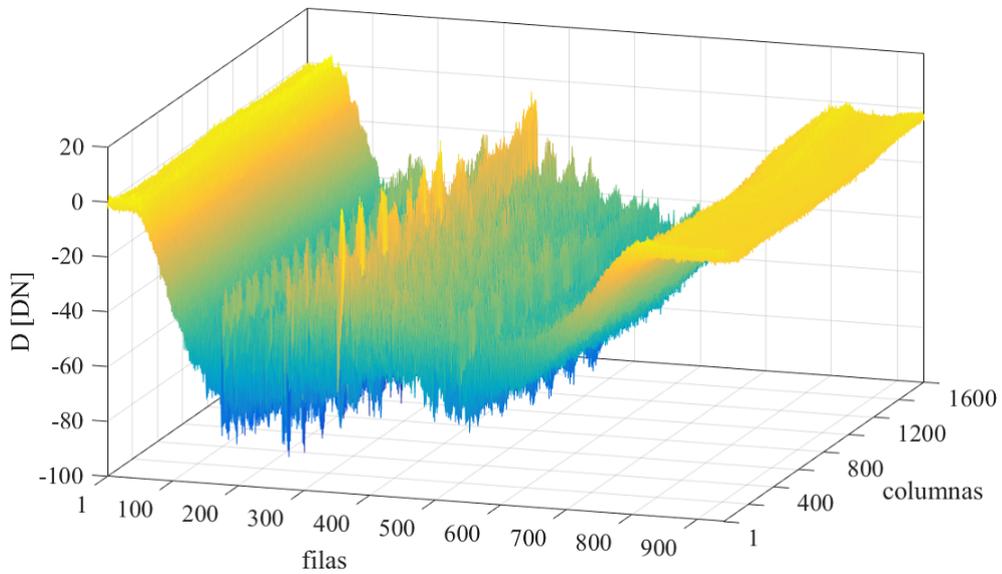


Figura 6.27. Coeficiente de calibración *offset* $D(i, j)$ en DN, para cada uno de los 941×1600 píxeles del sensor efectivamente iluminados. Vista en 3D.

Para evaluar si el modelo radiométrico propuesto resulta adecuado para la calibración radiométrica, se calculó, a partir de los residuos del ajuste lineal por cuadrados mínimos realizado para cada píxel $\delta y(i, j)$ y del valor en DN medido con la cámara $y(i, j)$, la cantidad:

$$\Delta y = \max \left(\frac{\delta y(i, j)}{y(i, j)} \times 100 \right) \quad (6.9)$$

Esta cantidad es una medida de qué tan bueno es el ajuste lineal para modelar los datos. En la *Figura 6.28* se puede observar Δy en función de la longitud de onda (fila del sensor). En la *Sección 6.6* se discute si en el contexto de este caso de calibración, el ajuste realizado resulta adecuado para todo el rango de longitudes de onda utilizado.

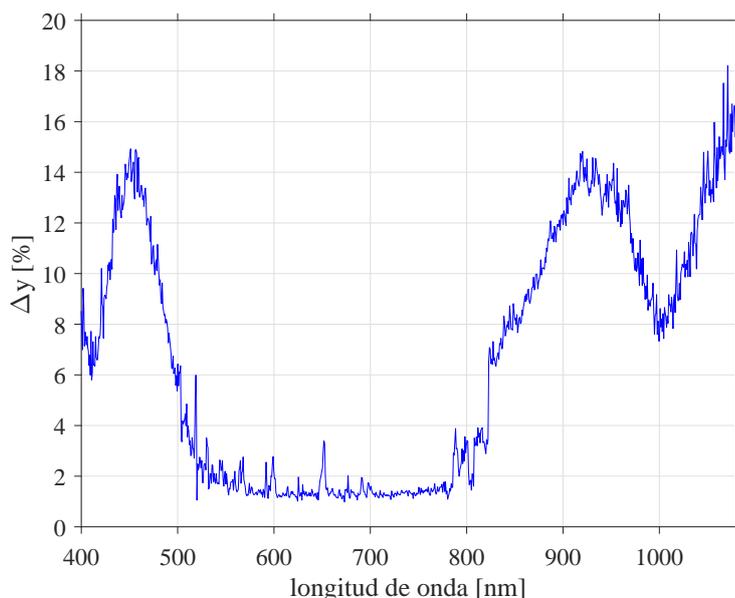


Figura 6.28. Cantidad Δy en función de la longitud de onda (fila del sensor). Esta indica una medida de la calidad del ajuste lineal realizado.

A modo de verificación de la calibración realizada, se aplicaron los coeficientes calculados para $t_{int}=5$ ms, para obtener la radiancia espectral calibrada a partir de la ecuación (6.8), utilizando imágenes en DN generadas por la cámara hiperespectral VNIR. En la *Figura 6.29* se puede observar la curva de radiancia espectral de referencia, junto con la curva de radiancia espectral calibrada y su incerteza, obtenidas mediante propagación de errores. Estas curvas de referencia son las utilizadas para la calibración radiométrica. Las figuras muestran la capacidad de reproducir estas curvas a partir de los coeficientes de calibración.

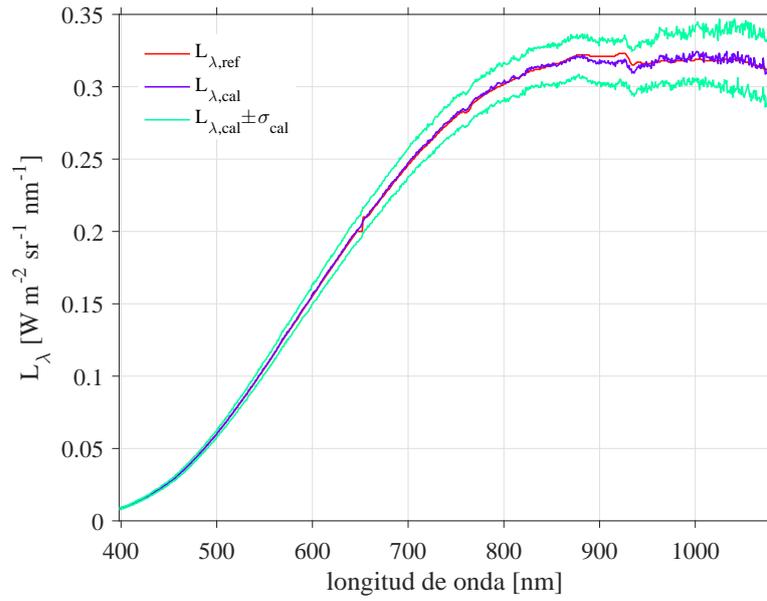


Figura 6.29. Radiancia espectral calibrada a partir de imágenes adquiridas frente a la esfera integradora, para un tiempo de integración de 5 ms.

Para evaluar la precisión de la calibración se calculó la incerteza relativa como:

$$\delta L_{\lambda,cal} = \frac{\sigma_{L_{\lambda,cal}}}{L_{\lambda,cal}} \quad (6.10)$$

donde $\sigma_{L_{\lambda,cal}}$ es la incerteza obtenida por propagación de errores de la calibración y $L_{\lambda,cal}$ es la radiancia espectral calibrada. En la *Figura 6.30 a)* se muestra esta cantidad en función de la longitud de onda. Por otro lado, a fin de evaluar la exactitud de la calibración, se calculó un error relativo como:

$$\Delta L_\lambda = \frac{(L_{\lambda,ref} - L_{\lambda,cal})}{L_{\lambda,cal}} \quad (6.11)$$

donde los subíndices *ref* y *cal* hacen referencia a la radiancia espectral de referencia y calibrada respectivamente. En la *Figura 6.30 b)* se presenta este error relativo en función de la longitud de onda.

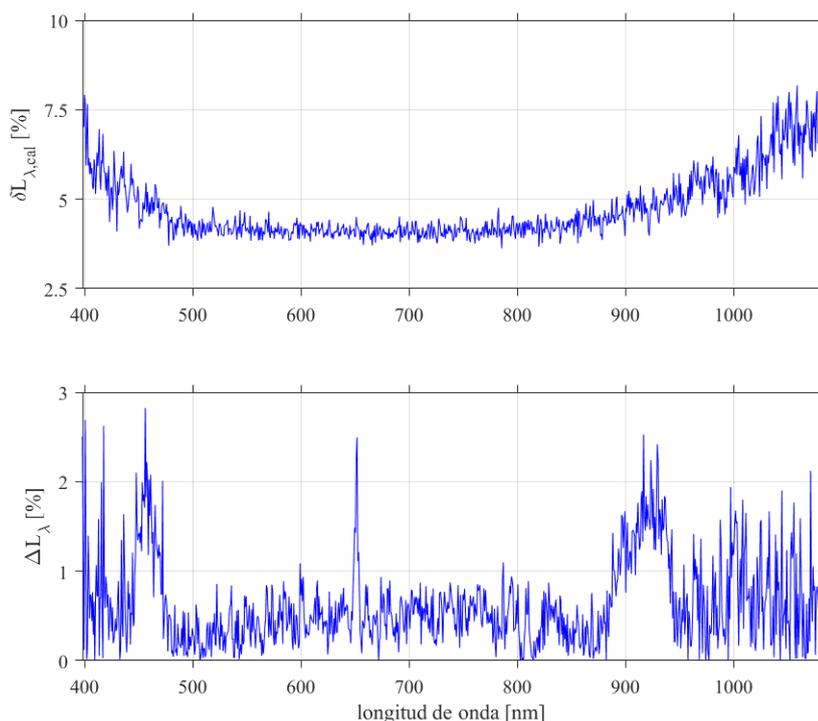


Figura 6.30. Arriba: incerteza relativa de la radiancia espectral calibrada; abajo: error relativo de la radiancia espectral calibrada. Datos adquiridos con un tiempo de integración t_{int} de 5 ms.

En la *Figura 6.31* se puede observar por un lado la imagen cruda en DN que entrega el instrumento para el caso considerado en la verificación. Por otro lado, la imagen en radiancia espectral calibrada, obtenida aplicando los coeficientes de calibración. Se puede observar que las no uniformidades que presenta la imagen en DN desaparecen en la imagen calibrada.

Por último, en la *Figura 6.32* se muestran curvas de radiancia espectral calibradas a partir de datos adquiridos con un tiempo de integración distinto del utilizado en la calibración, en este caso, imágenes adquiridas con un tiempo de integración de 9 ms. Esta verificación se realizó para evaluar la pertinencia de aplicar los coeficientes de calibración obtenidos a datos adquiridos con un tiempo de integración distinto al utilizado en la calibración. Como se puede observar en el gráfico, la curva calibrada no reproduce adecuadamente la referencia para longitudes de onda altas.

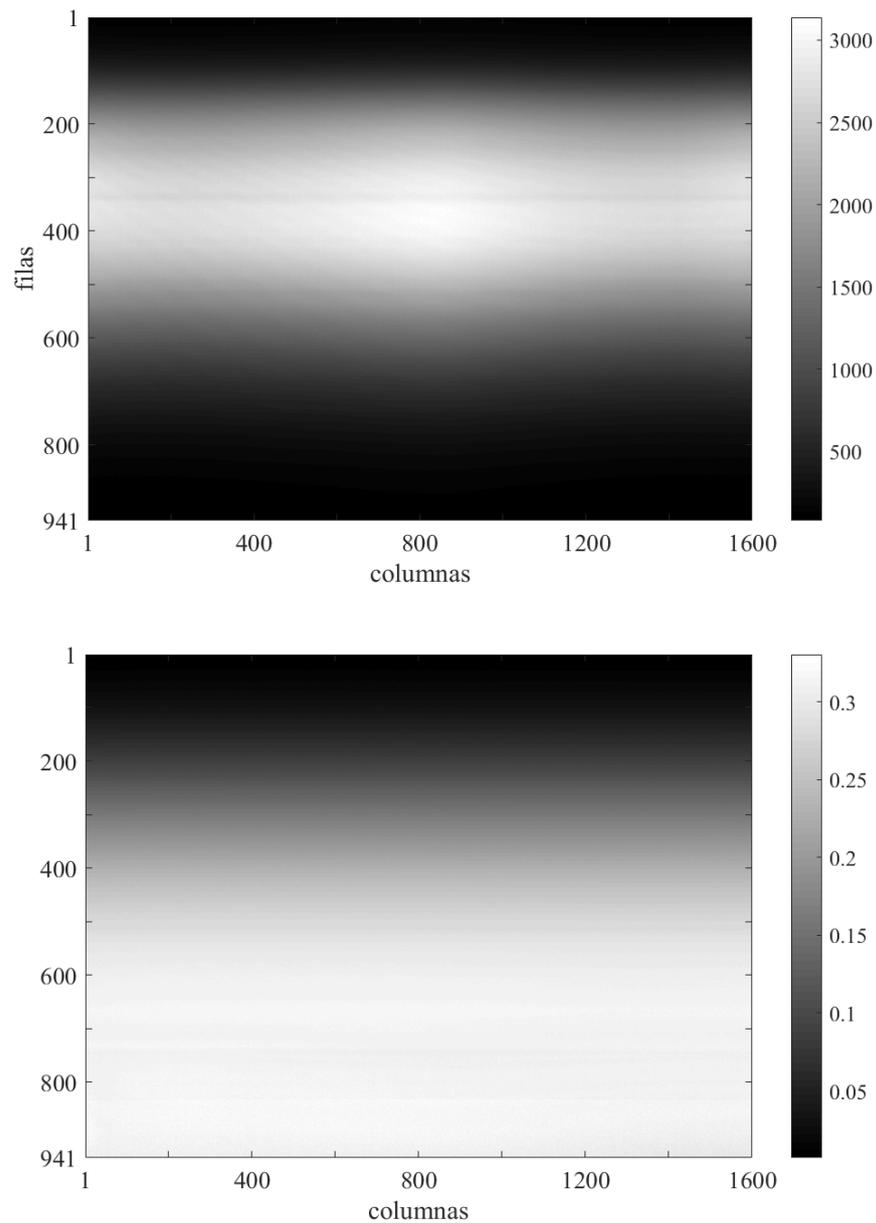


Figura 6.31. Arriba: imagen en DN generada por la cámara. Abajo: imagen calibrada en unidades de radiancia espectral ($Wm^{-2}sr^{-1}nm^{-1}$).

Para estudiar un poco más este punto, se calcularon la incerteza relativa (ecuación (6.10)) y el error relativo (ecuación (6.11)), lo cuales se muestran en las *Figuras 6.33*. Como muestran estos gráficos, si bien la incerteza relativa se mantiene siempre por debajo del 8%, el error relativo es alto para los extremos del rango espectral considerado.

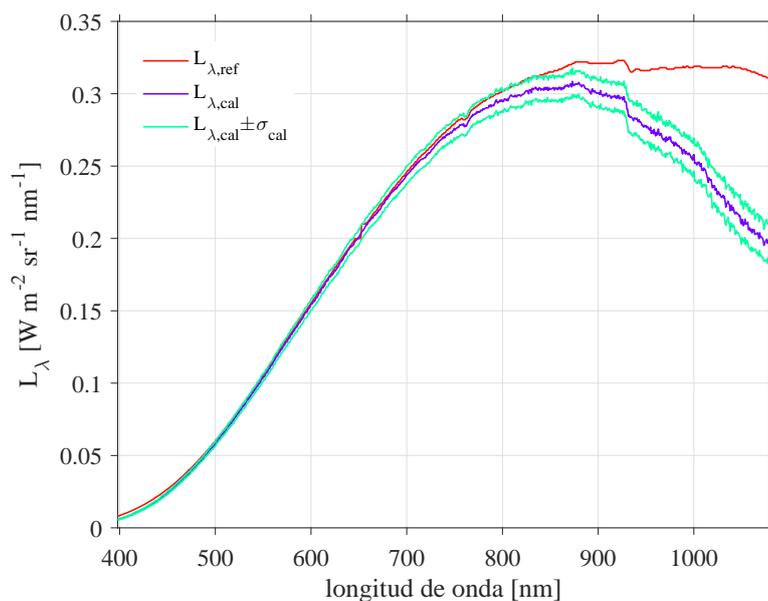


Figura 6.32. Radiancia espectral calibrada a partir de imágenes adquiridas frente a la esfera integradora, para un tiempo de integración de 9 ms. Columna 800 del sensor.

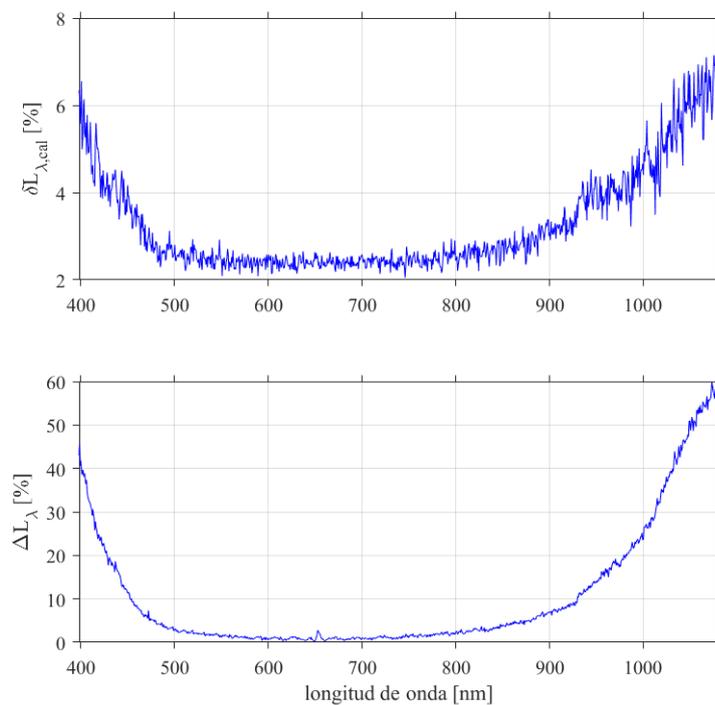


Figura 6.33. Arriba: incerteza relativa de la radiancia espectral calibrada; abajo: error relativo de la radiancia espectral calibrada. Datos adquiridos con un tiempo de integración distinto del utilizado en la calibración, en este caso t_{int} de 9 ms.

6.6 Discusión de resultados y conclusiones

La calibración de la cámara hiperespectral VNIR se abordó a nivel sistema, por lo que las interacciones entre componentes ópticos y electrónicos se incluyen en la caracterización y calibración y es posible detectar errores sistemáticos del sistema completo. Esta calibración a nivel sistema permitió además validar el modelo propuesto para el sensor y estimar incertezas del conjunto, tal como será utilizado.

Las fuentes utilizadas para la calibración, tanto espectral como radiométrica, son las disponibles en el Laboratorio de óptica de la UFS de CONAE. Esta situación planteó algunas limitaciones para la calibración. La falta de un certificado de calibración vigente de la esfera integradora originó la necesidad de caracterizar la radiancia espectral y la uniformidad de la señal en el puerto de la esfera. Esta caracterización se realizó utilizando un espectroradiómetro de transferencia que tampoco cuenta con un certificado de calibración reciente, pero que en este caso fue utilizado como un estándar de consenso. Esto impide establecer la trazabilidad de la radiancia espectral en el puerto de la esfera con un estándar nacional o internacional reconocido, lo cuál vuelve a la calibración radiométrica en relativa. Sin embargo, desde el punto de vista metodológico, el proceso realizado constituye una calibración radiométrica.

Al caracterizar la uniformidad de la fuente, se puso en evidencia la degradación del desempeño de la misma, si se considera la relación entre el área total del puerto de la esfera (ver *Figura 6.18*) y el área para la cual se caracterizó la uniformidad. Como se puede apreciar en la *Figura 6.19* la uniformidad se mantiene por encima del 99% en el área muestreada. Aunque en este caso no se plantearon requerimientos sobre la uniformidad de la fuente, se puede decir que la fuente presenta un mejor desempeño para longitudes de onda entre 500 nm y 900 nm. Se incorporó esta no uniformidad mediante la adición de una incerteza relativa equivalente a esta medida de no uniformidad para cada longitud de onda (es decir, cada fila). Esto resultó en una precisión para la radiancia espectral de referencia para la calibración de entre un 5.1% y 5.4% (1σ).

A partir de los posibles usos y aplicaciones que se prevé para la cámara hiperespectral VNIR se identificaron requerimientos para la calibración radiométrica que definen los límites de validez de la misma. En este sentido, la calibración radiométrica resulta válida para el rango espectral entre 398 nm a 1080 nm, determinado por la calibración espectral efectuada. En cuanto al rango de radiancias espectrales para las cuales la calibración resulta válida, este depen-

de de la longitud de onda, y está dado por los límites establecidos por las curvas de radiancias espectrales de la esfera integradora.

La caracterización del instrumento se llevó a cabo sin contar con requerimientos específicos de desempeño a verificar. En consecuencia, su objetivo fue implementar los métodos de cálculo de los distintos parámetros como se muestran en la literatura especializada y realizar los análisis básicos. La caracterización en una etapa de prevuelo no pretende realizar todos los análisis exhaustivos sobre todas las cuestiones, sino sólo sobre lo que está en relación a un determinado requerimiento por razones de economía. De cualquier manera, si una vez en vuelo surge la necesidad de algún análisis más fino, la metodología propuesta asegura que los datos de laboratorio están disponibles para ello.

La calibración radiométrica realizada resulta válida para un tiempo de integración para la adquisición de datos de 5 ms. Al explorar la posibilidad de extender la validez de los coeficientes de calibración a otros tiempos de integración, se pudo observar que los errores relativos alcanzaban niveles altos (hasta el 60%), en particular en los extremos del rango espectral.

El modelo propuesto, junto con el método de cálculo de los coeficientes resulta adecuado para el presente trabajo. El ajuste lineal presenta un mejor desempeño para longitudes de onda entre 500 nm y 800 nm, donde la medida Δy (ver *Figura 6.28*) es menor al 2%. Por fuera de este intervalo, esta medida de no linealidad supera el 2%, llegando al 14% para longitudes de onda en los extremos del rango espectral abarcado por la calibración. Los píxeles para los cuales el modelo propuesto presenta un desempeño menos preciso (su respuesta se aleja del comportamiento lineal propuesto) son aquellos en los que se abarcaron niveles de señal menores (ver *Figura 6.23*). Esto se puede explicar por un lado porque para longitudes de onda altas, por encima de 800 nm, la radiancia espectral incidente muestra niveles altos, pero la eficiencia cuántica para estas longitudes de onda es baja, lo cual genera una señal baja. En cambio, para longitudes de onda bajas, la eficiencia cuántica es alta, pero la radiancia espectral de la esfera integradora es baja, generando valores de DN bajos igualmente.

Aunque en este caso de calibración no se plantearon requerimientos sobre la precisión con que el modelo debe ajustar los datos, si existiera tal requerimiento, estas diferencias para distintas longitudes de onda pueden llevar a excluir regiones del sensor en las cuales el modelo no ha cumplido con dicho requerimiento. En este caso, surge la necesidad de decidir si se restringe el uso del instrumento a longitudes de onda para las cuales el modelo satisface los requerimientos, evaluando el impacto que esto tendría en la aplicación. O bien, se realiza una nueva

calibración.

La verificación realizada al aplicar los coeficientes de calibración para obtener la radiancia espectral calibrada a partir de datos adquiridos con un tiempo de integración de 9 ms (ver *Figura 6.32*) muestra que si bien la precisión de la radiancia espectral calibrada no excede el 5 %, el error relativo alcanza valores mucho mayores (ver *Figura 6.33*), en particular en los intervalos de longitud de onda donde la señal en DN es baja. Esto significa que, o bien se restringe el rango espectral donde la calibración es válida, o bien se realiza una calibración para cada tiempo de integración de interés.

6.7 Discusión del proceso

Este proceso de calibración constituye un caso concreto de calibración en laboratorio. Los aspectos discutidos en esta sección resultan una base sobre la cual se puede refinar la metodología propuesta en el presente trabajo de tesis.

La calibración de la cámara hiperespectral VNIR se abordó a nivel sistema pues el instrumento se encontraba completamente ensamblado e integrado en el momento en que se accedió a él, y por el acotado tiempo disponible para realizar la caracterización y calibración se estimó riesgoso intentar desarmarlo.

Salvando las diferencias entre una cámara a ser montada en una plataforma satelital y una cámara aerotransportada, en las secciones anteriores se presentó la implementación de la caracterización y calibraciones espectral y radiométrica de la cámara hiperespectral VNIR. En esta sección se presentan aspectos programáticos del proceso realizado, el cual cubrió las etapas establecidas en la metodología propuesta en el capítulo anterior.

Desde el punto de vista del desarrollo temporal del proceso de calibración tal como fue realizado, es posible distinguir las siguientes etapas principales:

1. Una etapa de adecuación del laboratorio donde se llevaron a cabo las experiencias de medición. Esta adecuación incluyó la puesta a punto de las fuentes de calibración utilizadas tanto para la calibración espectral como para la calibración radiométrica. Fue necesario además el diseño y fabricación de un soporte especial para posicionar la cámara frente al puerto de la esfera integradora.
2. Una etapa de preparación del instrumento para su caracterización y calibración. Esta etapa consistió principalmente en el desarrollo de un software

de control específico para la calibración, que contemplara la posibilidad de configurar tiempos de integración, cantidad de imágenes a adquirir, temperatura del sensor de manera ágil y flexible.

3. Una etapa de adquisición de datos para la caracterización de las fuentes de calibración y para la caracterización y calibración del instrumento.
4. Una etapa de procesamiento de datos y producción de resultados que en última instancia llevaron a la obtención de los coeficientes de calibración radiométrica.

ID	Descripción de la actividad	Instrumento y su equipo de soporte	Fuente y su equipo de soporte	Participantes
A1	Familiarización con el uso del espectroradiómetro.			LR, MEP: responsables de la calibración de la cámara VNIR. IT : operador del espectroradiómetro
A2	Caracterización de la iluminación del laboratorio.			
A3	Medición de la radiancia espectral en el punto central del puerto de la esfera integradora USS-4000.		Esfera integradora USS-4000	
A4	Caracterización de la uniformidad de la esfera integradora USS-4000.	Espectroradiómetro FieldSpec 4 Hi-Res	Rack con fuentes de alimentación y control de las lámparas de la esfera.	
A5	Caracterización de la estabilización de la esfera USS-400 a encendido.	Tripode, adaptador. Notebook para control y adquisición de datos.	Lámpara de descarga de HgAr Mesa óptica	
A6	Adquisición del espectro de las lámparas de descarga a utilizar para la calibración espectral.		Monocromador Digikröm DK 240	
A7	Calibración del monocromador, para utilizarlo como fuente de referencia para la calibración espectral.		Esfera integradora LRS-455. Fuente de alimentación y control. Mesa óptica	
A8	Medición de la radiancia espectral en el puerto de la esfera integradora LRS-455.			
A9	Adquisición de datos para la calibración radiométrica de la cámara VNIR.	Cámara hiperespectral VNIR Soporte de la cámara.	Esfera integradora USS-4000 Rack con fuentes de alimentación y control de las lámparas de la esfera.	
A10	Adquisición de datos para la calibración espectral de la cámara VNIR.	Controladores, fuentes, PC.	Lámpara de descarga de HgAr Mesa óptica	

Figura 6.34. Plan de tareas a realizar para la calibración de la cámara VNIR.

El factor más determinante del proceso fue el tiempo. La necesidad de utilizar el espectroradiómetro para la caracterización de las fuentes de calibración

requirió dar prioridad a esta tarea, ya que implicaba acordar un cronograma con personal que no se encuentra en el CETT. En consecuencia, se diseñó un plan breve (ver *Figura 6.34*), el cual se identificaron las distintas tareas a realizar, las fuentes de referencia y los equipos de soporte necesarios y el personal involucrado en cada actividad.

Luego, se elaboraron cronogramas para cada una de las dos semanas en las que se utilizó el instrumento. Estos cronogramas se muestran en las *Figuras 6.35* y *6.36*. Como se puede observar en ellas, se distribuyeron las experiencias que requerían el uso del espectroradiómetro, contemplando márgenes de tiempo para poder afrontar contingencias, y para reflejar la poca experiencia del grupo que llevó adelante la calibración.

Semana 1

Planificado

Día	Medio día	Horario	Actividad	Participantes
1	1	9 a 12 hs	A1, A2	LR, MEP, IT.
	2	13 a 16:50 hs	A3	
2	3	9 a 12 hs	A4	
	4	13 a 16:50	Margen	
3	5 y 6	9 a 16:50 hs	A7	LR, MEP, IT.
4	7	9 a 12 hs	A9	
	8	13 a 16:50 hs	A8	
5	9	9 a 12 hs	A5	Margen
	10	13 a 16:50 hs		

Ejecutado

Día	Medio día	Horario	Actividad	Participantes
1	1	9 a 12 hs	Sin actividad	LR, MEP, IT.
	2	13 a 16:50 hs	A1, A2, A3	
2	3	9 a 12 hs	A3	
	4	13 a 16:50	A3, A4	
3	5 y 6	9 a 16:50 hs	A7	LR, MEP, IT.
4	7	9 a 12 hs	A4, A6	
	8	13 a 16:50 hs	A7	
5	9	9 a 12 hs	A5, A7,	
	10	13 a 19:00 hs	A7, A8	

Figura 6.35. Comparación entre cronogramas planificado y ejecutado de las actividades realizadas para la calibración de la cámara VNIR. Semana 1.

En cuanto al personal involucrado en la calibración, se distinguen tres grupos: el grupo a cargo de la calibración, el responsable del laboratorio y el operador del espectroradiómetro. Cada uno de ellos intervino en etapas distintas del proceso. El grupo encargado de la calibración participó de todas las actividades realizadas, ya sea de manera directa o indirecta. El responsable del laboratorio intervino principalmente durante la primera etapa de adecuación del laboratorio, y en particular en el desarrollo y fabricación del soporte mecánico para la cámara VNIR. En este caso actuó como intermediario con el taller que realizó el soporte. El operador del espectroradiómetro participó únicamente durante las actividades de adquisición de datos para la caracterización de las fuentes de calibración.

Semana 2

Planificado

Día	Medio día	Horario	Actividad	Participantes
	1	9 a 12 hs	A3	LR, MEP, IT.
	2	13 a 16:50 hs		
2	3	9 a 12 hs	A4	
	4	13 a 16:50		
3	5 y 6	9 a 16:50 hs	Margen	
4	7	9 a 12 hs	A6	LR, MEP, IT.
	8	13 a 16:50 hs	A7	
5	9	9 a 12 hs	A5	
	10	13 a 16:50 hs	Margen	

Ejecutado

Día	Medio día	Horario	Actividad	Participantes
1	1	9 a 12 hs	A3	LR, MEP, IT.
	2	13 a 16:50 hs	A3, A4	
2	3	9 a 12 hs	A6	
	4	13 a 16:50	A4*	
3	5 y 6	9 a 16:50 hs	A10	LR, MEP.
4	7	9 a 12 hs	A4	LR, MEP, IT.
	8	13 a 16:50 hs	A5, A8	
5	9	9 a 12 hs	A10	LR, MEP.
	10	13 a 19:00 hs		

*Esta actividad queda interrumpida por falla en el soporte del radiómetro.

Figura 6.36. Comparación entre cronogramas planificado y ejecutado de las actividades realizadas para la calibración de la cámara VNIR. Semana 2.

Por último, en cuanto a la organización de las experiencias de adquisición de datos para la caracterización de fuentes y calibración del instrumento, se elaboraron procedimientos detallados en los cuales se especificó:

- objetivo y descripción de la tarea a realizar;
- personas involucradas y sus roles y responsabilidades;
- fuentes, instrumentos y equipo de soporte a utilizar;
- una descripción de la configuración a utilizar para las mediciones;
- un procedimiento paso a paso, especificando parámetros de configuración de fuentes, instrumentos y equipos, así como detalles sobre la adquisición de datos.

Los procedimientos paso a paso fueron utilizados como base para asentar comentarios y observaciones sobre las actividades realizadas, modificaciones al procedimiento así como información sobre los archivos de datos de cada medición realizada, para su fácil identificación. De esta manera, estos procedimientos se transformaron en el registro de las actividades tal cual fueron realizadas.

6.7.1 Lecciones aprendidas (“Lessons learned”)

El caso presentado en este capítulo representa un primer abordaje a la calibración de una cámara hiperespectral. A partir de esta experiencia es posible y necesario extraer lecciones aprendidas que servirán para mejorar la metodología propuesta y permitir que futuras calibraciones resulten exitosas. Entre las lecciones aprendidas se pueden resaltar:

- La importancia de elaborar un software apropiado para el control de la cámara y la adquisición de datos, acorde a las necesidades específicas de la campaña de calibración y de las características particulares del instrumento a calibrar. Para esto es conveniente elaborar requerimientos específicos indicando parámetros, rangos y otros aspectos de la configuración del instrumento que se necesitará modificar de manera regular y accesible durante las experiencias de adquisición de datos.
- Es importante contar con equipos de soporte e instrumental de laboratorio adecuado y de calidad, para poder alcanzar la precisión requerida en las mediciones. En consecuencia, es importante dedicar tiempo y esfuerzo a la elaboración de requerimientos para el laboratorio donde se realizarán las experiencias.

- Entre el equipamiento del laboratorio sobresalen las fuentes a utilizar para la calibración, tanto espectral como radiométrica. La calidad de las fuentes afecta directamente a la calidad de la calibración. Es importante elaborar requerimientos detallados para las mismas.
- Es esencial contar con personal capacitado, tanto en el manejo y control de la cámara a calibrar como del instrumental del laboratorio. Esto favorece un aprovechamiento eficiente del tiempo disponible para la campaña de calibración y asegura que los datos recolectados serán adecuados.
- En cuanto a la planificación de la campaña de calibración, el tiempo asignado a la misma resulta un *driver* del proceso. En consecuencia, es importante estimar tiempos y destinar márgenes adecuados para cada tarea teniendo en cuenta la experiencia que se posee en calibración de cámaras hiperespectrales y la madurez del proyecto.
- Es importante destinar tiempo y esfuerzo a la elaboración de procedimientos para la adquisición de datos para la calibración. Estos procedimientos son la guía del trabajo en el laboratorio y en ellos debe constar toda la información necesaria para realizar de manera exitosa cada experiencia.

7

Conclusiones

Para la calibración en laboratorio de instrumentos EO/IR existen lineamientos y buenas prácticas que contienen propuestas metodológicas subyacentes, pero que no han sido explicitadas y sintetizadas en una metodología. Como parte de esta tesis se ha realizado una revisión de la bibliografía existente en el tema y en este trabajo se han descrito los aspectos más sobresalientes de dichos lineamientos. Sin embargo, no se ha podido identificar una metodología elaborada por especialistas en base a un consenso sobre estos lineamientos y buenas prácticas que permita una estandarización.

Cada proceso de calibración en laboratorio presenta diferencias relacionadas principalmente con las características específicas del instrumento y el contexto en que se realiza, en este caso, el de un proyecto satelital. Estas pueden aportar información valiosa que se pierde al intentar generalizarla en una metodología que pueda ser aplicada a experiencias diversas.

Con esto en mente, en el presente trabajo se presentaron las bases de una metodología para la calibración en laboratorio de una cámara hiperspectral que forma parte de la carga útil de un satélite. El desarrollo de esta metodología se abordó a partir de una propuesta inicial basada en un relevamiento del tema. Luego, esta propuesta se aplicó a un caso concreto de calibración en laboratorio.

En este sentido se puede afirmar que:

- se sentaron las bases para el desarrollo de dicha metodología, a partir de una descripción del proceso de calibración que permite su división en etapas;
- esta división hace posible identificar y describir las tareas específicas para cada etapa, a fin de poder elaborar una planificación detallada para la

implementación del proceso;

- la metodología propuesta provee elementos concretos que permiten coordinar el proceso de calibración con el desarrollo del proyecto satelital, aportando a la elaboración de requerimientos para la calibración, identificación de *drivers* del proceso y como fuente principal para la elaboración de especificaciones y procedimientos de la calibración;

Se realizó la calibración en laboratorio de una cámara hiperespectral VNIR que forma parte del sistema de captura de imágenes hiperespectrales que se desarrolla en CONAE. Este caso concreto de calibración resulta una aplicación particular de la metodología de calibración y representa una primera instancia de refinamiento de la misma. En este sentido se puede afirmar que:

- se logró la calibración de la cámara VNIR, en particular la radiométrica, en concordancia con los requerimientos planteados para la misma. En este sentido quedaron determinadas las condiciones de validez de la calibración realizada, en particular en términos del tiempo de integración;
- se pudo implementar las etapas propuestas en la metodología, facilitando la identificación de las tareas a realizar para alcanzar los objetivos;
- se identificó un rango de longitud de onda entre 500 nm y 800 nm, en el cual la calibración presenta una incerteza relativa menor;
- se pudo observar que la aplicación de los coeficientes de calibración calculados para la calibración de datos crudos obtenidos con un tiempo de integración distinto del utilizado para el cálculo de dichos coeficientes conlleva incertezas y errores relativos significativos.

7.1 Trabajo futuro

El abordaje que se adoptó para el desarrollo de esta metodología encierra un proceso iterativo de aplicación de una propuesta metodológica inicial a experiencias de calibración similares para avanzar en su refinamiento. En este sentido, este proceso puede incluir la calibración en laboratorio de una cámara hiperespectral capaz de adquirir información en la porción del infrarrojo de onda corta (SWIR, 1000 nm a 2500 nm) de espectro electromagnético de reflectancia solar. Este instrumento se encuentra también disponible en el Laboratorio de Óptica de la UFS en CONAE y junto con la cámara VNIR compone el sistema de captura de información hiperespectral que se encuentra en desarrollo en CONAE.

Por otro lado, esta metodología puede extenderse a la calibración en laboratorio de cámaras multispectrales. Esta extensión requiere adaptar el modelo del proceso de calibración para incorporar las características específicas de este tipo de instrumento. En particular, la calibración espectral posee características diferentes para el caso de cámaras multispectrales, en las cuales se tienen pocas bandas discontinuas de ancho considerablemente mayor al caso de cámaras hiperespectrales.

Bibliografía

- [1] M. T. Eismann, “Hyperspectral remote sensing,” SPIE Bellingham, 2012.
- [2] R. O. Green, “Lessons and key results from 30 years of imaging spectroscopy,” in *SPIE Optical Engineering and Applications*, International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [3] M. E. Schaepman, S. L. Ustin, A. J. Plaza, T. H. Painter, J. Verrelst, y S. Liang, “Earth system science related imaging spectroscopy. an assessment,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, 2009.
- [4] A. F. Goetz, “Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, pp. S5–S16, 2009.
- [5] G. A. Shaw y H. K. Burke, “Spectral imaging for remote sensing,” *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 14, no. 1, 2003.
- [6] G. Vane, “Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). a description of the sensor, ground data processing facility, laboratory calibration, and first results,” 1987.
- [7] R. O. Green, M. L. Eastwood, C. M. Sarture, T. G. Chrien, M. Aronsson, B. J. Chippendale, J. A. Faust, B. E. Pavri, C. J. Chovit, M. Solis, *et al.*, “Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS),” *Remote Sensing of Environment*, vol. 65, no. 3, 1998.
- [8] G. Vane, R. O. Green, T. G. Chrien, H. T. Enmark, E. G. Hansen, y W. M. Porter, “The airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS),” *Remote sensing of environment*, vol. 44, no. 2-3, 1993.
- [9] T. Cocks, R. Jenssen, A. Stewart, I. Wilson, y T. Shields, “The HyMap™ airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance,” in *Proceedings of the 1st EARSeL workshop on Imaging Spectroscopy*, EARSeL, 1998.

- [10] S. K. Babey y C. D. Anger, “Compact airborne spectrographic imager (CASI): a progress review,” in *Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing*, International Society for Optics and Photonics, 1993.
- [11] M. E. Schaepman, M. Jehle, A. Hueni, P. D’Odorico, A. Damm, J. Weyermann, F. D. Schneider, V. Laurent, C. Popp, F. C. Seidel, *et al.*, “Advanced radiometry measurements and Earth science applications with the Airborne Prism Experiment (APEX),” *Remote Sensing of Environment*, vol. 158, 2015.
- [12] S. G. Ungar, J. S. Pearlman, J. A. Mendenhall, y D. Reuter, “Overview of the earth observing one (EO-1) mission,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 6, 2003.
- [13] J. S. Pearlman, P. S. Barry, C. C. Segal, J. Shepanski, D. Beiso, y S. L. Carman, “Hyperion, a space-based imaging spectrometer,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 6, 2003.
- [14] M. J. Barnsley, J. J. Settle, M. A. Cutter, D. R. Lobb, y F. Teston, “The proba/chris mission: A low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the earth surface and atmosphere,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 7, 2004.
- [15] R. Buckingham y K. Staenz, “Review of current and planned civilian space hyperspectral sensors for EO,” *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 34, no. S1, 2008.
- [16] J. M. Palmer y B. G. Grant, *The art of radiometry*. SPIE Press Bellingham, WA, USA, 2010.
- [17] J. Tansock, D. Bancroft, J. Butler, C. Cao, R. Datla, S. Hansen, D. Helder, R. Kacker, H. Latvakoski, M. Mylnczak, *et al.*, “Guidelines for radiometric calibration of electro-optical instruments for remote sensing,” 2015.
- [18] R. H. Sampieri, C. F. Collado, y P. B. Lucio, *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill Interamericana, 2006.
- [19] “PMI MT Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (guía del PMBOK),” 2008.
- [20] R. Moreland y C. L. Claunch, “Nasa project planning and control handbook,” tech. rep., NASA, 2016.

-
- [21] J. R. Wertz, D. F. Everett, y J. J. Puschell, *Space mission engineering: the new SMAD*. Microcosm Press, 2011.
- [22] M. Cerocchi, P. De León, J. Gari, J. Meseguer, E. Roggero, E. Rondelli, y E. Urbajtel, *Introducción a la Tecnología de Sistemas Espaciales*. UTN-FRH-GTA, 1998.
- [23] “Misiones satelitales - CONAE.” <http://www.conae.gov.ar/satelites/satelites.html>. [Online; último acceso: 23-11-2017.].
- [24] “Misiones satelitales - CONAE.” <http://www.conae.gob.ar/index.php/espanol/misiones-satelitales>. [Online; último acceso: 23-11-2017.].
- [25] “NASA Systems Engineering Handbook (nasa/sp-2007-6105 rev1),” 2007.
- [26] A. Harper, M. Ryschkewitsch, A. Obenschain, y R. Day, “General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects,” *NASA Goddard Space Flight Center, GSFC-STD-7000*, 2005.
- [27] “ECSS-E-ST-10-02C. System Engineering - Verification,” tech. rep., ESA Requirements and Standards and Division, 2009.
- [28] “Rules for the Design, Development, Verification, and Operation of Flight Systems - GSFC - STD - 1000, Revision A,” tech. rep., Goddard Space Flight Center, NASA, 2005.
- [29] P. Fortescue, G. Swinerd, y J. Stark, *Spacecraft systems engineering*. John Wiley & Sons, 2011.
- [30] R. Datla, J. Rice, K. Lykke, B. Johnson, J. Butler, y X. Xiong, “Best practice guidelines for pre-launch characterization and calibration of instruments for passive optical remote sensing,” *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 116, no. 2, 2011.
- [31] A. Goetz, “Principles of narrow band spectrometry in the visible and IR: instruments and data analysis,” *Imaging Spectroscopy: Fundamentals and Prospective Applications*, pp. 21–32, 1992.
- [32] D. Landgrebe, “The evolution of Landsat data analysis,” *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 63, no. 7, pp. 859–867, 1997.
- [33] “Understanding spectra from the earth.” <http://www.seos-project.eu/modules/earthspectra/earthspectra-c01-p15.html>. [Online; último acceso: 08-07-2017.].

- [34] J. Dozier, “HIRIS—the high resolution imaging spectrometer,” *Proc. SPIE—Recent Adv. Sensors, Radiometry Data Process. Remote Sens.*, vol. 924, pp. 10–22, 1988.
- [35] E. Roberts, J. Huntington, y R. Denize, “The Australian Resource Information and Environment Satellite (ARIES), Phase A Study,” 1997.
- [36] U. Del Bello, P. Kealy, R. Meynart, y M. Rast, “PRISM: a hyperspectral imager for a future ESA land observation mission,” in *European Satellite Remote Sensing Conference, ESA, Paris, France*, vol. 25, p. 28, 1995.
- [37] C. Tobehn, M. Kassebom, E. Schmälder, J. Fuchs, U. Del Bello, P. Bianco, y E. Battistelli, “Spectra, surface process and ecosystem changes through response analysis,” in *Proceedings of the German Aerospace Congress DGLR-2002*, vol. 185, 2002.
- [38] M. Bergeron, A. Hollinger, K. Staenz, M. Maszkiewicz, R. A. Neville, S.-E. Qian, y D. G. Goodenough, “Hyperspectral environment and resource observer (HERO) mission,” *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 34, no. S1, pp. S1–S11, 2008.
- [39] “International Spaceborne Imaging Spectroscopy (ISIS) Technical Committee.” http://www.grss-ieee.org/wp-content/uploads/2013/07/ISIS_GRSS_report_final.pdf. [Online; último acceso: 23-05-2017.].
- [40] E. M. Middleton, P. K. Campbell, K. F. Huemmrich, Q. Zhang, D. R. Landis, S. G. Ungar, L. Ong, N. H. Pollack, y Y.-B. Cheng, “EO-1/hyperion: Nearing twelve years of successful mission science operation and future plans,” 2012.
- [41] Q. Wang, C. Wu, Q. Li, y J. Li, “Chinese HJ-1A/B satellites and data characteristics,” *Science China Earth Sciences*, vol. 53, pp. 51–57, 2010.
- [42] K. Murali, G. M. Gouda, S. Bisht, H. Jhaka, y J. Sharma, “Spectral calibration of 64 band hyper spectral imager of Chandrayaan-1,” in *Advances in Geosciences: Volume 25: Planetary Science (PS)*, pp. 133–147, World Scientific, 2011.
- [43] R. L. Lucke, M. Corson, N. R. McGlothlin, S. D. Butcher, D. L. Wood, D. R. Korwan, R. R. Li, W. A. Snyder, C. O. Davis, y D. T. Chen, “Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean: instrument description and first images,” *Applied Optics*, vol. 50, no. 11, pp. 1501–1516, 2011.

-
- [44] P. Stefano, P. Angelo, P. Simone, R. Filomena, S. Federico, S. Tiziana, A. Umberto, C. Vincenzo, N. Acito, D. Marco, *et al.*, “The PRISMA hyperspectral mission: Science activities and opportunities for agriculture and land monitoring,” in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International*, pp. 4558–4561, IEEE, 2013.
- [45] T. Matsunaga, A. Iwasaki, S. Tsuchida, J. Tanii, O. Kashimura, R. Nakamura, H. Yamamoto, T. Tachikawa, y S. Rokugawa, “Current status of hyperspectral imager suite (HISUI),” in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International*, pp. 3510–3513, IEEE, 2013.
- [46] L. Guanter, H. Kaufmann, K. Segl, S. Foerster, C. Rogass, S. Chabrillat, T. Kuester, A. Hollstein, G. Rossner, C. Chlebek, *et al.*, “The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for earth observation,” *Remote Sensing*, vol. 7, no. 7, 2015.
- [47] M. Mercury, R. Green, S. Hook, B. Oaida, W. Wu, A. Gunderson, y M. Chodas, “Global cloud cover for assessment of optical satellite observation opportunities: A HypsIRI case study,” *Remote sensing of environment*, vol. 126, pp. 62–71, 2012.
- [48] K. Staenz, A. Mueller, y U. Heiden, “Overview of terrestrial imaging spectroscopy missions,” in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International*, pp. 3502–3505, IEEE, 2013.
- [49] K. Staenz y A. Held, “Summary of current and future terrestrial civilian hyperspectral spaceborne systems,” in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International*, pp. 123–126, IEEE, 2012.
- [50] L. Filchev, “Satellite hyperspectral earth observation missions—a review,”
- [51] A. Börner, M. Schaepman, D. Schläpfer, L. Wiest, y R. Reulke, “The simulation of APEX data: the sensor approach,” *Imaging Spectrometry V, Denver, SPIE*, vol. 3753, pp. 235–246, 1999.
- [52] V. E. Brando y A. G. Dekker, “Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality,” *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 41, no. 6, 2003.
- [53] W. J. Moses, A. A. Gitelson, R. L. Perk, D. Gurlin, D. C. Rundquist, B. C. Leavitt, T. M. Barrow, y P. Brakhage, “Estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters using airborne hyperspectral data,” *water research*, vol. 46, no. 4, 2012.

- [54] P. D. Hunter, A. N. Tyler, L. Carvalho, G. A. Codd, y S. C. Maberly, "Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators for cell populations and toxins in eutrophic lakes," *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, no. 11, 2010.
- [55] S. L. Ustin, D. A. Roberts, J. A. Gamon, G. P. Asner, y R. O. Green, "Using imaging spectroscopy to study ecosystem processes and properties," *BioScience*, vol. 54, no. 6, 2004.
- [56] J. Gamon, J. Penuelas, y C. Field, "A narrow waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency," *Remote Sensing of Environment*, vol. 41, no. 1, 1992.
- [57] D. A. Sims y J. A. Gamon, "Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features," *Remote Sensing of Environment*, vol. 84, no. 4, 2003.
- [58] S. L. Ustin, A. A. Gitelson, S. Jacquemoud, M. Schaepman, G. P. Asner, J. A. Gamon, y P. Zarco-Tejada, "Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, 2009.
- [59] E. R. Hunt Jr, C. S. Daughtry, J. J. Qu, L. Wang, y X. Hao, "Comparison of hyperspectral retrievals with vegetation water indices for leaf and canopy water content," in *SPIE Optical Engineering and Applications*, International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [60] E. Ben-Dor, S. Chabrillat, J. Demattê, G. Taylor, J. Hill, M. Whiting, y S. Sommer, "Using imaging spectroscopy to study soil properties," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, 2009.
- [61] F. D. Van der Meer, H. M. Van der Werff, F. J. van Ruitenbeek, C. A. Hecker, W. H. Bakker, M. F. Noomen, M. van der Meijde, E. J. M. Carranza, J. B. de Smeth, y T. Woldai, "Multi and hyperspectral geologic remote sensing: A review," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 14, no. 1, 2012.
- [62] S. Chabrillat, E. Ben-Dor, R. A. V. Rossel, y J. A. Demattê, "Quantitative soil spectroscopy," *Applied and Environmental Soil Science*, 2013.
- [63] E. T. Slonecker, D. W. Allen, y R. G. Resmini, "Towards establishing compact imaging spectrometer standards," *International Journal of Experimental Spectroscopic Techniques*, vol. 1, no. 1, 2016.

- [64] J. R. Schott, *Remote sensing: the image chain approach*. Oxford University Press on Demand, 2007.
- [65] J. R. Jensen, *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective: 2nd (second) Edition*. Pearson Prentice Hall, 2007.
- [66] D. Roberts, “Calibration of airborne imaging spectrometer data to percent reflectance using field spectral measurements,” in *19. International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp. 679–688, 1985.
- [67] J. E. Conel, R. O. Green, G. Vane, C. J. Bruegge, R. E. Alley, y B. J. Curtiss, “Airborne Imaging Spectrometer-2: Radiometric spectral characteristics and comparison of ways to compensate for the atmosphere,” in *31st Annual Technical Symposium*, pp. 140–157, International Society for Optics and Photonics, 1987.
- [68] M. Cable, *Calibration: A Technician’s Guide*. ISA, 2005.
- [69] C. L. Wyatt, V. E. Privalski, R. U. Datla, y B. Taylor, *Recommended Practice, Symbols, Terms, Units, and Uncertainty Analysis for Radiometric Sensor Calibration*. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 1998.
- [70] R. V. Datla, R. Kessel, A. W. Smith, R. N. Kacker, y D. Pollock, “Review article: Uncertainty analysis of remote sensing optical sensor data: guiding principles to achieve metrological consistency,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 31, no. 4, pp. 867–880, 2010.
- [71] “Digikröm DK240 datasheet, Spectral Products.” http://polaris.nipr.ac.jp/~uap/IntegrationSphere/document/narrow-band_LightSource/DK%20series%20User%20Manual%20rev%20Mar%202009.pdf. [Online; último acceso: 12-06-2017.].
- [72] J. R. Janesick, *Photon transfer*. SPIE press San Jose, 2007.
- [73] “EMVA standard 1288: Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras,” 2016.
- [74] B. Jähne, *Digital Image Processing*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [75] N. Yokoya, N. Miyamura, y A. Iwasaki, “Preprocessing of hyperspectral imagery with consideration of smile and keystone properties,” *SPIE Asia-Pacific Remote Sensing*, pp. 78570B–78570B, 2010.

- [76] A. Paviotti, F. Ratti, L. Poletto, y G. M. Cortelazzo, “Multispectral acquisition of large-sized pictorial surfaces,” *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, vol. 2009, no. 1, p. 793756, 2009.
- [77] “pco.1600 cooled digital 14 bit CCD camera system.” https://www.pco.de/fileadmin/user_upload/pco-product_sheets/pco.1600_2000_4000_data_sheet.pdf. [Online; último acceso: 28-03-2017].
- [78] “Sensor Kodak Kai-2001 Device Performance Specification.” https://www.pco-tech.com/fileadmin/user_upload/db/download/KAI-2001LongSpec.pdf. [Online; último acceso: 06-06-2017].
- [79] “Espectrógrafo Inspector V10E, datasheet.” <http://www.specim.fi/downloads/VIS-VNIR-ImSpectors-ver1-2016.pdf>. [Online; último acceso: 06-06-2017].
- [80] R. O. Green, B. E. Pavri, y T. G. Chrien, “On-orbit radiometric and spectral calibration characteristics of EO-1 Hyperion derived with an underflight of AVIRIS and in situ measurements at Salar de Arizaro, Argentina,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 6, pp. 1194–1203, 2003.
- [81] R. Sandau, *Digital airborne camera: introduction and technology*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [82] L. F. Rocco, M. E. Pereyra, M. Labanda, S. Masuelli, y A. Menescardi, “Caracterización de una cámara hiperespectral para su calibración espectral,” in *Actas del 9no. Congreso Argentino de Tecnología Espacial 2017*.
- [83] L. F. Rocco, “Modelización y análisis de una cámara hiperespectral para su calibración radiométrica,” 2017. Tesis de Maestría en Instrumentos Satelitales, UFS, CONAE.
- [84] “USS-4000 Uniform Calibration Source - LabSphere.” http://host.web-print-design.com/labsphere/products/integrating_sphere_systems/uss4000.htm. [Online; último acceso: 28-03-2017].
- [85] “Fieldspec 4 Hi-Res datasheet.” <http://www.analytik.co.uk/wp-content/uploads/2016/03/fieldspec-4-high-resolution-datasheet.pdf?x29422>. [Online; último acceso: 07-06-2017].

